

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний  
(повна назва інституту/факультету)

Приладів і систем орієнтації та навігації  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК 531.383

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
Бурау Н.І.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 2018 р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і назва спеціальності)

на тему: Алгоритмічна компенсація дрейфів мікромеханічних гіроскопів

Виконав : студент 6 курсу, групи ПГ-71мп  
(шифр групи)

Шелевер Владислав Михайлович  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н. Аврутов В. В.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант Розроблення стартап-проекту Бояринова К. О.  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складає 106 сторінок, в ній містяться 27 ілюстрацій, 25 таблиць і 37 використаних джерел.

**Актуальність:** На сьогоднішній день актуальною є проблема підвищення точності мікромеханічних гіроскопів, які чутливі до дії зовнішніх впливів, насамперед зміни температури середовища. Важливою проблемою є вдосконалення традиційних та розроблення нових методів алгоритмічної компенсації температурних дрейфів мікромеханічних гіроскопів, які викликають похибки систем орієнтації та навігації, в яких вони є основним чутливим елементом.

**Мета:** покращити точність мікромеханічних гіроскопів шляхом вдосконалення методів алгоритмічної компенсації температурних дрейфів.

**Завдання:**

1. Інформаційно-аналітичний огляд стану методів алгоритмічної компенсації дрейфів ММГ.
2. Аналіз традиційних методів алгоритмічної компенсації температурних дрейфів ММГ.
3. Застосування алгоритмів штучних нейронних мереж для компенсації температурних дрейфів ММГ.
4. Експериментальна перевірка досліджуваних методів.

**Об'єкт:** температурні дрейфи ММГ.

**Предмет:** сучасні методи алгоритмічної компенсації температурних дрейфів ММГ.

**Методи дослідження:** Для дослідження використано методи теорії приближення, методи аналізу зміни характеристик чутливих елементів, методи комп'ютерного моделювання.

**Наукова новизна:**

1. Встановлено залежність точності компенсації температурних дрейфів ММГ від вибору методу апроксимації.

2. Розроблено та перевірено методи алгоритмічної компенсації температурних дрейфів ММГ з використанням алгоритмів штучних нейронних мереж.

**Практичне значення:** Розроблені алгоритми можуть використовуватися для покращення точності ММГ в сучасних системах орієнтації; Алгоритмічне і програмне забезпечення для визначення параметрів моделі компенсації температурних дрейфів ММГ та їх моделювання.

**Публікації:**

1. Шелевер В.М. Компенсація температурних дрейфів мікромеханічних гіроскопів штучною нейронною мережею / В.М. Шелевер, В.В. Аврутов // Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні: Збірник праць XIV Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених/ 4-5 грудня 2018 р. – К.:ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2018. — С. 37-40.
2. Шелевер В.М. Алгоритм компенсації температурних дрейфів мікромеханічних гіроскопів штучною нейронною мережею / В.М. Шелевер, В.В. Аврутов // Спеціальне приладобудування: стан і перспективи: зб. наук. пр. / Казенне підприємство спеціального приладобудування "Арсенал". – Київ, 4-5 грудня 2018. – 82-85с.

**Ключові слова:** мікромеханічний гіроскоп; мікроелектромеханічна система; температурний дрейф; апроксимація; штучна нейронна мережа.

## ABSTRACT

The master's thesis consists of 106 pages, it contains 27 illustrations, 25 tables and 37 sources used.

**Actuality:** For today it is topical to increase the accuracy of micromechanical gyroscopes, which are sensitive to the effects of external influences, first of all, changes in the temperature of the environment. An important problem is the improvement of traditional and development of new methods of algorithmic compensation of temperature differences of micromechanical gyroscopes, which cause orientation and navigation systems errors in which they are the main sensitive element.

**Purpose:** to improve the accuracy of micromechanical gyroscopes by improving the methods of algorithmic compensation of temperature drifts.

**Task:**

1. Information-analytical review of the state of methods of algorithmic compensation of drift MEMS gyroscope.
2. Analysis of traditional methods of algorithmic compensation of temperature drift of MEMS gyroscope
3. Application of algorithms of artificial neural networks for compensation of temperature drifts MEMS gyroscope.
4. Experimental testing of the investigated methods.

**Object:** temperature drift of MEMS gyroscope.

**Subject:** Modern methods of algorithmic compensation of temperature drift of MEMS gyroscope.

**Methods of research:** For the study, methods of approximation theory, methods of analysis of changes in the characteristics of sensitive elements, methods of computer modeling are used.

**Scientific novelty:**

1. The dependence of the compensation of the temperature drift of MEMS gyroscope on the choice of the approximation method is established.

2. Methods of algorithmic compensation of MEMS gyroscope temperature drift with the use of artificial neural networks algorithms have been developed and tested.

**Practical significance:** Developed algorithms can be used to improve the accuracy of MEMS gyroscope in modern orientation systems; Algorithmic and software for determining the parameters of the compensation model of MEMS gyroscope temperature drift and their modeling.

**Publications:**

1. Shelever V. M. Compensation of temperature drift of micromechanical gyroscopes by artificial neural network / V.M. Shelever, V.V. Avrutov // Efficiency of Engineering Solutions in Instrument Making: Labor Collection XIV All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists / December 4-5, 2018 - K .: PBF, KPI them. Igor Sikorsky - 2018. - P. 37-40.
2. Shelever V.M. Algorithm for compensation of temperature drifts of micromechanical gyroscopes by artificial neural network / V.M. Shelever, V.V. Avrutov // Special instrument making: state and prospects: / State Enterprise of Special Instrumentation "Arsenal". - Kyiv, December 4-5, 2018. -P 82-85.

**Keywords:** micromechanical gyroscope; microelectromechanical system; temperature drift; approximation; artificial neural network.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП .....	11
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ.....	12
1.1 Аналіз проблеми підвищення точності ММГ .....	12
1.2 Аналіз шляхів зменшення похибок ММГ .....	13
1.3 Мета і завдання дослідження .....	22
РОЗДІЛ 2 ОПИС МЕТОДІВ АЛГОРИТМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДРЕЙФІВ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ГІРОСКОПІВ .....	23
2.1 Модель вихідного сигналу ММГ .....	23
2.2 Методи апроксимації температурних залежностей ММГ поліномом ....	24
2.3 Алгоритми компенсації температурних дрейфів ММГ штучними нейронними мережами .....	33
Висновки до розділу 2 .....	48
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ПЕРЕВІРКИ МЕТОДІВ АЛГОРИТМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ДРЕЙФІВ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ГІРОСКОПІВ .....	49
3.1 Характеристики досліджуваного ММГ .....	49
3.2 Результати калібрування ДКШ .....	51
3.3 Результати експериментальної перевірки методів алгоритмічної компенсації температурних дрейфів ДКШ .....	56
Висновки до розділу 3 .....	68
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ «АЛГОРИТМІЧНА КОМПЕНСАЦІЇ ДРЕЙФІВ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ГІРОСКОПІВ».....	69

4.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології).....	69
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	72
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	73
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту .....	80
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	83
Висновки до розділу 4 .....	86
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	90
Додаток А.....	95

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ММГ – мікромеханічний гіроскоп

МЕМС – мікроелектромеханічні системи

ЧЕ – чутливий елемент

ДКШ – датчик кутової швидкості

ІВМ – інерціальний вимірювальний модуль

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

ШНМ – штучна нейронна мережа

МНК – метод найменших квадратів

ЗПП – зворотне поширення помилки

РБФ – радіальні базисні функції



## ВСТУП

Пошук нових шляхів створення інерціальних чутливих елементів (ЧЕ) з необхідними технічними характеристиками і розвиток техніко-технологічної бази сучасної твердотільної мікроелектроніки призвели до появи нового класу приладів – інтегральних мікромеханічних гіроскопів (ММГ) [1]. Перевагами ММГ є: малі габарити і маса, мале енергоспоживання, низька собівартість, висока надійність та стійкість до зовнішніх впливів.

На сьогоднішній день область застосування ММГ досить широка (системи навігації та орієнтації, системи стабілізації, діагностики та інші), а тому до них ставляться високі вимоги точності визначення параметрів руху такими сенсорами.

Проведений аналіз публікацій в області сучасних датчиків кутової швидкості дозволяє стверджувати, що точність ММГ, насамперед залежить від стабільності його параметрів протягом роботи, яким властиві похибки, спричинені механічними (дія прискорення, вібрацій) та температурними впливами, наявністю рухомих елементів та технологічних недосконалостей виготовлення чутливих елементів [2].

Виділяють два підходи нівелювання таких похибок: апаратний і алгоритмічний.

В магістерській дисертації досліджуються методи алгоритмічної компенсації температурних дрейфів ММГ, проводиться їх моделювання та аналіз отриманих результатів.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

В даному розділі розглянуто проблеми підвищення точності ММГ. Також розглянуто сучасні наукові праці, присвячені розробці та дослідженню методів алгоритмічної компенсації дрейфів ММГ.

#### 1.1 Аналіз проблеми підвищення точності ММГ

Незважаючи на досить великий світовий досвід проектування ММГ на даний момент існує великий ряд проблем, які умовно можна розділити на проблеми технологічного характеру і проблеми науково-дослідницького плану. Всі ці проблеми вимагають рішення досить різноманітних задач механіки, електроніки, конструювання, метрології, матеріалознавства, інформатики та спрямовані на підвищення точності ММГ і зниження їх собівартості [2].

Технологічні проблеми пов'язані з труднощами виконання ЧЕ з високою точністю геометричних розмірів, через їх малі розміри. Це є причиною статичних і динамічних дисбалансів рухомої частини та нерівножорсткістю пружних елементів підвісу, від жорсткості яких залежить масштабний коефіцієнт ММГ [2, 3]. До технологічних проблем можна віднести і необхідний високий коефіцієнт добротності пружного підвісу, величина і стабільність якого залежать від багатьох факторів [2]. Реалізація високої добротності можлива при вакумуванні ЧЕ, що вимагає вирішення складних конструкторських завдань.

Додаткові похибки гіроскопів викликані його чутливістю до впливу зовнішніх чинників, основні з яких – дія прискорення, вібрації та вплив температури.

В умовах експлуатації ММГ часто піддаються прискоренням та вібраціям, тому дослідження їх дії на ММГ є важливою задачею для забезпечення точності ЧЕ при механічних впливах.

Проведений аналіз показав, що ММГ, виготовлені за технологією МЕМС, дуже чутливі до впливу температури. Під впливом температури виникають зміни лінійних розмірів конструкції, змінюються модулі пружності використовуваних матеріалів. У конструкції виникають внутрішні механічні напруги, внаслідок різних коефіцієнтів температурного розширення матеріалів, що з'єднуються, порушується геометрична форма, змінюються сили в'язкого тертя [4].

В роботі [5] досліджується вплив температури на динамічні характеристики ММГ. Показано, що при зміні температури в діапазоні  $-40^{\circ}\text{C} \dots + 80^{\circ}\text{C}$  змінюються резонансні частоти, добротність гіроскопа. Це призводить до зміни масштабного коефіцієнту та дрейфу нульового сигналу. При цьому зміна масштабного коефіцієнту викликана зміною власної частоти системи та зміною розмірів електродів, що призводить до зміни ємностей (викликана зміною модуля поздовжньої пружності), деформацією структури і появою механічних напружень. Зміна зміщення нуля, обумовлена тепловим дрейфом механічної та електричної частин ММГ.

Таким чином технологічні дефекти, механічні та температурні впливи змінюють характеристики елементів ММГ, що призводить до зміни параметрів моделі вихідного сигналу та зниження точності.

## 1.2 Аналіз шляхів зменшення похибок ММГ

Похибка ММГ – це характеристика гіроскопа, кількісно виражена відхиленням номінального значення вимірюваної кутової швидкості від її справжнього значення [6].

Загальну похибку ММГ можна представити у вигляді суми систематичної  $\varepsilon_s$  та випадкової  $\varepsilon_R$  похибок:

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_R \quad (1.1)$$

Значення систематичної похибки залишається постійним або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях, а випадкові похибки змінюються випадковим чином.

В дисертації розглядаються тільки систематичні похибки ММГ та їх компенсація.

Найвагомішими систематичними похибками ММГ є похибка коефіцієнта перетворення (нестабільність масштабного коефіцієнта) і зміщення (дрейф) нульового сигналу. Похибки коефіцієнта перетворення пов'язані з його зміною (дрейфом) в процесі роботи гіроскопа. Зміщення нуля - покази гіроскопа, відмінні від нуля, при нульовій входній кутовій швидкості. Рівності нулю кутової швидкості відповідає випадок встановлення ЧЕ на нерухомій основі таким чином, щоб кутова швидкість добового обертання Землі була перпендикулярна вимірювальній осі ММГ [6].

Розглянемо методи компенсації систематичних похибок викликаних зовнішніми впливами.

Виділяють два підходи нівелювання систематичних похибок: апаратний і алгоритмічний. Крім того вводять поняття пасивних та активних методів компенсації. До пасивних методів належать способи компенсації, впроваджені на стадії розробки або виробництва датчика.

Так для компенсації дії вібрацій можуть використовуватися антивібраційні підвіси, а для захисту від ударів проектується спеціальні упори в підвісі ММГ.

Зменшення температурних похибок може досягатися шляхом використання матеріалів, менш схильними до впливу температури для виготовлення ЧЕ, або використовувати додатковий шар для ізоляції кремнію. Такі методи хороші тим, що не збільшують енергоспоживання і включення в схему додаткових електричних схем. Недоліком їх є значне ускладнення технологічного процесу, необхідність пошуку нових матеріалів, що призводить до збільшення часу та вартості виробу.

В роботі [7] розглядаються методи компенсації температурних похибок, в яких в якості індикатора температури пропонується використання резонансної частоти гіроскопа. Система температурної компенсації не залежить від теплової інерції, здійснює компенсацію в режимі реального часу, не вимагає додаткового термометра.

Апаратно термокомпенсацію можна здійснювати застосуванням метода термостатування, який полягає в нагріванні ЧЕ до заданої температури статкування, та її підтримання протягом роботи. Використання термостатування дозволяє виключити гістерезис і нелінійність ЧЕ, та відпадає необхідність вимірювання характеристик кожного датчика. Однак даний метод трудомісткий, вимагає конструктивних змін системи, що збільшує час на її проектування, збільшується енергоспоживання, розміри та ціна.

Використання тільки пасивних методів компенсації не може повністю компенсувати вплив зовнішніх чинників на ММГ.

До активних методів компенсації відносяться методи корекції вихідного сигналу ММГ. Так для компенсації дії прискорення та вібрацій на ММГ зазвичай використовуються алгоритми, які поєднують покази гіроскопів та акселерометрів, наприклад: комплементарний, Махоні, Маджвіка.

Компенсація дрейфу нуля ММГ за показами мікромеханічного акселерометра (ММА) наведено в роботі [8]. Для реалізації застосовується комплементарний фільтр, який став досить поширеним для об'єднання ММГ та ММА та усунення їх недоліків. Досягається це за рахунок того, що комплементарний фільтр є фільтром високих частот для ММГ, а для ММА - фільтром низьких частот. Таким чином, на низьких частотах переважають покази акселерометра, де відсутні дрейфи гіроскопа. Використання даного фільтра є простим з точки зору аналітичних розрахунків, моделювання та реалізації на мікропроцесорній техніці.

Застосування комплементарного фільтра з компенсацією температурного дрейфу нуля ММГ показано в роботі [9]. Автори роботи провели експериментальне дослідження, та за допомогою використання лінеаризованої залежності побудували аналітичний вираз дрейфу нуля ММГ від температури і використали його для компенсації дрейфу при обчисленні значень кутів орієнтації.

Використання комплементарного фільтра є досить ефективним для компенсації дрейфу гіроскопа, але його застосування обмежене через його основний недолік - пропускання шумів акселерометра в області середніх і низьких частот.

Використання простого фільтру низьких частот для компенсації дрейфу ММГ розглядається в роботі [10]. Фільтр представлений у вигляді аперіодичної ланки з великою постійною часу. Вихідний сигнал фільтру – дрейф ММГ, який необхідно компенсувати. Основана перевага методу – його простота при практичному застосуванні. Крім того, немає необхідності в калібруванні ММГ.

Математичне обґрунтування причини виникнення похибок ММГ із-за дії прискорень та вдосконалений алгоритм їх компенсації наведено в роботі [11]. Авторами встановлено, що  $g$ -чутливість викликає не похибку зміщення нульового сигналу, а додаткову похибку масштабного коефіцієнта, що може значно підвищити похибки ІВМ. Варто сказати, що ця похибка проявляється тільки при кутовій швидкості вздовж осі збудження та прискоренні вздовж осі чутливості. Оцінюють похибку використовуючи симуляцію методом скінченних елементів, та перевіряють її на практиці використовуючи центрифугу та різноманітні динамічні тести. В роботі запропоновано та перевірено ефективний метод компенсації  $g$ -чутливості ММГ.

В ІВМ середньої і високої точності всі ММГ мають компенсацію температурних похибок параметрів моделі їх вихідних сигналів. На практиці обмежуються температурним калібруванням масштабних коефіцієнтів та зміщень нулів ММГ. При цьому, зазвичай, для вимірювання поточної температури використовуються індивідуальні температурні вимірювальні елементи для кожного ЧЕ. В деяких прецизійних ММГ використовуються декілька термодатчиків для врахування теплового поля всередині гіроскопа, крім цього інколи враховується і напрямок зміни температури, для компенсації температурного гістерезису [12].

Для алгоритмічної компенсації температурних похибок зазвичай застосовуються методи апроксимації та інтерполяції температурних залежностей поліномом. У випадку застосування ММГ в складі ІВМ низької точності, компенсація температурних похибок часто не відбувається, так як температурне калібрування призводить до підвищення собівартості БІНС та значному збільшенню часу калібрувань і випробувань [12]. При цьому компенсація зміни параметрів моделі вихідного сигналу від впливу температури в таких комплексних системах

відбувається з використанням різноманітних фільтрів для оцінки цих змін та їх подальшого врахування [12].

Для кращого розуміння стану проблеми алгоритмічної компенсації температурного дрейфа ММГ проаналізуємо попередні дослідження в цій області.

У роботі [13] розглядається компенсація температурних похибок параметрів моделі вихідних сигналів ММГ, а саме апроксимація температурних залежностей поліномом різних степенів. В процесі роботи використовувалися покази реальних ЧЕ, що дозволило авторам оцінити похибки апроксимації, та на основі отриманих результатів встановити, що використання апроксимуючої функції першого степеня дає недостатню точність температурної компенсації, а використання полінома високих степенів (3-5 порядок) дають дуже близькі результати компенсації високої точності, але підвищення порядку збільшує об'єм обчислень, що навантажує процесор. Обираючи порядок поліному доцільно зупинитися на компромісному значенні, яке б давало необхідну точність компенсації і швидкість обчислень.

Оптимізований метод тривимірного калібрування ММГ запропоновано в роботі [14]. По-перше, була встановлена комплексна модель похибки, яка враховує інструментальні похибки неспівпадіння осей чутливості ММГ з базовими осями блоку, похибки неортогональності осей тривісного блоку ММГ, масштабний коефіцієнт і зміщення нульового сигналу. Після стандартної процедури калібрування блоку ММГ в широкому діапазоні температур, методом найменших квадратів було визначено матрицю параметрів моделі та отриманий вектор компенсації похибок. Варто зазначити, що вектор компенсації похибки у відомій температурній точці розраховується методом інтерполяції Лагранжа. Експериментальні результати підтверджують більшу ефективність компенсації температурних дрейфів ММГ запропонованим методом, порівняно з традиційним. Недоліком є необхідність збільшувати кількість вимірювань для отримання більшої кількості вузлів інтерполяції.

В роботі [15] запропоновано вдосконалений метод температурного калібрування та компенсації температурного дрейфу з використанням метода

інтерполяції Лагранжа. Насамперед, було зменшено крок кутової швидкості в заданому діапазоні калібрування блоку ММГ, отримавши більше вузлів інтерполяції. Виходячи з традиційної моделі вихідного сигналу блоку ММГ, було складено модель інтерполяційних параметрів, які залежать від температури і кожна група параметрів зберігається окремо. Порівнюючи результати калібрування традиційним та запропонованим методами зроблено висновки, що обидва методи справедливі для покращення точності ММГ, але запропонований метод є більш ефективним, оскільки краще компенсується температурний дрейф нульового сигналу та усуваються похибки нелінійності масштабного коефіцієнту на всьому діапазоні температур. Незважаючи на те, що запропонований метод потребує додаткові блоки пам'яті, у разі застосування методу на практиці, сучасний цифровий процесор є достатньо потужним, щоб виконати ці обчислення.

Застосування ШНМ для температурного калібрування та компенсації зміщення нульового сигналу ММГ обговорюється в роботі [16]. Виходячи з того, що метод інтерполяції температурної залежності поліномом, який проходить через точки температур калібрування, має деякі недоліки, а саме коли він застосовується при різкій зміні зміщення нуля на вузькому температурному інтервалі, в даній роботі запропоновано використання ШНМ зі зворотнім поширенням помилки для покращення компенсації. Обрана архітектура ШНМ досить проста, та включає два приховані шари з двома нейронами в кожному. Щоб уникнути перенавчання ШНМ в разі поганого набору навчальних даних, використовується метод «найближчого сусіда» для отримання єдиного набору даних, після чого він оцінюється критерієм узгодженості Колмогорова. Результати випробувань показали незначне покращення ефективності температурної компенсації нульового сигналу ММГ.

Ефективний варіант реалізації ШНМ для температурної компенсації зміщення нульового сигналу наведено в роботі [17]. Архітектура ШНМ має один прихований шар, який включає 6 нейронів з активаційними функціями гіперболічного тангенса. Вихідний шар нейронів має лінійні активаційні функції. Для тренування використовується алгоритм Левенберга-Марквардта, який має дуже велику



швидкість роботи, порівняно з іншими. Для оцінки ефективності описаний метод порівнювався з апроксимацією методом найменших квадратів, після чого за дисперсіями похибок кількісно оцінили обидва методи. Результати показують правильність компенсації та зменшення дисперсії похибки майже в 4 рази.

Схожий алгоритм розглядається в роботі [18], де використовується ШНМ з одним прихованим шаром, який включає три нейрони. Активаційні функції і алгоритм навчання обрані такі ж, як в роботі [19]. Метод цікавий тим, що ШНМ використовується тільки для отримання матриць ваг та зміщень, які дозволяють отримати функцію залежності нульового сигналу кожної осі блоку ММГ від внутрішньої температури. Для перевірки алгоритму були розраховані значення кутів орієнтації інерціального вимірювального модуля (ІВМ) після початкової виставки та зміну цих кутів з перебігом часу. Компенсація температурних дрейфів ММГ дозволила зменшити похибку в декілька разів, а у випадку з кутом курсу – майже в 10 разів.

Модель температурного дрейфу зміщення нуля ММГ, який також залежить і від швидкості зміни температури, розглядається в роботі [20]. Підвищення точності компенсації дрейфу досягається застосуванням ШНМ. Кількість прихованих шарів – 2. Оптимальний вибір кількості нейронів у прихованих шарах визначається експериментальним шляхом, поступово збільшуючи їх кількість і оцінюючи при цьому середнє квадратичне відхилення (СКВ) каліброваного (з використанням ШНМ) значення. Кількість нейронів у прихованих шарах пропонується обирати з оглядом на швидкість навчання та подальшу роботи ШНМ. Навчання відбувається за алгоритмом Левенберга-Марквардта. Для оцінки ефективності роботи запропонований алгоритм порівнюється з температурною компенсацією дрейфу ММГ поліномом 5-го порядку. СКВ, розрахованих за показами ММГ кутів орієнтації, в результаті відпрацювання запропонованого методу покращились на порядок, порівняно з поліноміальною.

В роботі [21] запропоновано нову модель температурної компенсації для ІВМ на основі ШНМ з радіальними базисними функціями (RBF-мережі), яка компенсує значні детерміновані похибки тріад ММГ та мікромеханічних акселерометрів (ММА)

в широкому діапазоні температур. Варто зазначити, що RBF-мережі мають ряд переваг. По-перше, вони моделюють довільну нелінійну функцію за допомогою всього одного прихованого шару і немає необхідності вирішувати питання про кількість шарів. По-друге, параметри лінійної комбінації у вихідному шарі можна повністю оптимізувати за допомогою добре відомих методів лінійного моделювання, які працюють швидко і не мають проблеми з локальними мінімумами. Крім того, RBF-мережі краще підходять для шумних вхідних сигналів, саме тому авторами була обрана така архітектура мережі. На вхід ШНМ подаються сигнали ЧЕ та виміряна поточна температура, на виході отримують температурну похибку датчика, яку необхідно компенсувати. В результаті отримують шість окремих ШНМ (для кожної осі ММГ та ММА) з відповідними параметрами. Навчання ШНМ відбувається в кілька етапів. Спочатку визначаються центри та відхилення для радіальних елементів, після чого оптимізуються параметри лінійного вихідного шару. Для оцінки ефективності алгоритму, проводилися статичні та динамічні тести при нагріванні IBM. Результати показують, що підхід, заснований на даній ШНМ, може зменшити СКВ до 99% для нерухомого ММГ (статика), тоді як метод поліноміальної компенсації дозволяє зменшити СКВ до 87%. Для динамічного руху значення СКВ поліпшилось на 49% з поліноміальною компенсацією та на 81% - з компенсацією ШНМ.

Для поліпшення компенсації температурного дрейфу ММГ, в роботі [22] застосували рекурентну ШНМ (мережа Елмана) оптимізовану генетичним алгоритмом, який дозволяє підвищити точність обробки вхідних даних. В алгоритмі модель температурного дрейфу ММГ враховує температуру, швидкість зміни температури та зв'язок між цими параметрами. Для порівняння розглядаються дві ШНМ: рекурентна ШНМ з такими ж входами, але без застосування генетичного алгоритму, та досліджувана ШНМ, але входом якої є тільки поточна температура. Кількісна оцінка забезпечується порівнянням стохастичних похибок ММГ розрахованих методом варіацій Алана для кожного алгоритму. Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що запропонований алгоритм компенсації

зменшив досліджувані похибки на порядок. Недоліком даного алгоритму є складність практичної реалізації рекурентної ШНМ з генетичним алгоритмом та низька швидкість навчання.

Практичне рішення застосування ШНМ для комплексної компенсації залежності нульового сигналу ММГ як від температури, так і від впливу прискорення (g-чутливість) приводиться в роботі [23]. Під комплексною компенсацією розуміється одночасна компенсація як дії прискорення, так і температури на чутливий елемент ММГ. Для порівняння наведеного методу, в роботі використовується метод компенсації вище зазначених похибок поліномом різних порядків, крім того, розглядається поєднання цих двох методів. Після експериментальної перевірки, авторами був зроблений висновок про необхідність компенсації впливу прискорення, та ефективність застосування ШНМ для компенсації g-чутливості ММГ. Вибір оптимального методу компенсації залежить від вимог до необхідної точності компенсації, та обчислювальних можливостей ЕОМ.

Недоліками компенсації похибок ММГ за допомогою ШНМ, насамперед, є, необхідність навчання ШНМ, ефективність якого залежить від обраної архітектури (вибір типу ШНМ, кількість прихованих шарів та нейронів в них, вибір активаційних функцій), вибірки цільових даних для навчання, вибору алгоритму, швидкості та кількості ітерацій при навчанні та інших гіперпараметрів. Всі ці недоліки призводять до затрат часу на підбір параметрів ШНМ та певне ускладнення алгоритму.

Детальний аналіз характеру температурного дрейфу ММГ наведений в роботі [24]. Автори виділяють декілька типів температурного дрейфу, а саме: дрейф після включення ЧЕ (нагрів); температурний гістерезис, який має нелінійний характер і залежить від напрямку та швидкості зміни температури; залежність від швидкості зміни температури. Крім того, в роботі приведено нову модель температурного гістерезису, та запропоновано методику визначення всіх необхідних параметрів температурної залежності з метою подальшого усунення відповідних похибок.

Розглядаючи внутрішню будову та принцип роботи ММГ, в роботі [25] встановлена залежність зміщення нульового сигналу ММГ не тільки від зміни

температури, а від градієнта (швидкості зміни) температури. В роботі запропонована нова модель температурної компенсації та проведено експериментальні дослідження даного методу. Результати випробувань показали покращення точності ММГ на один порядок після компенсації. У порівнянні з загальними методами компенсації, що базуються тільки на зміні температури, середня похибка може бути зменшена в 7~20 разів.

Недоліком методів в роботах [24] та [25] є ускладнення стандартної процедури температурного калібрування ММГ для визначення всіх необхідних параметрів математичних моделей.

### **1.3 Мета і завдання дослідження**

**Мета:** покращити точність ММГ шляхом вдосконалення методів алгоритмічної компенсації температурних дрейфів.

**Завдання:**

1. Інформаційно-аналітичний огляд стану методів алгоритмічної компенсації дрейфів ММГ.
2. Аналіз традиційних методів алгоритмічної компенсації температурних дрейфів ММГ.
3. Застосування алгоритмів штучних нейронних мереж для компенсації температурних ММГ.
4. Експериментальна перевірка досліджуваних методів.

**Об'єкт:** температурні дрейфи ММГ.

**Предмет:** сучасні методи алгоритмічної компенсації температурних дрейфів ММГ.

## РОЗДІЛ 2

### ОПИС МЕТОДІВ АЛГОРИТМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДРЕЙФІВ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ГІРОСКОПІВ

#### 2.1 Модель вихідного сигналу ММГ

Розглянемо модель вихідного сигналу мікромеханічних датчиків кутової швидкості (ДКШ) з однією віссю чутливості.

Нехай вісь чутливості ДКШ є вісь Z. За ідеальних умов вихідний сигнал ДКШ  $U_{\omega z}$  (напруга, струм, код АЦП) повинен бути пропорційним проекції абсолютної кутової швидкості обертання  $\omega$  на вісь Z [25]:

$$U_{\omega z} = k_z \cdot \omega_z \quad (2.1)$$

де  $k_z$  – спільний коефіцієнт передачі (масштабний коефіцієнт), що включає коефіцієнт передачі власного датчика кута (датчика переміщень) ДКШ, коефіцієнти передачі підсилювача та інших можливих перетворювачів вимірювального ланцюга [25].

В реальності кожен окремий ДКШ має свої індивідуальні параметри у вигляді масштабного коефіцієнта, зміщення нуля, чутливості до зміни температури, чутливості до прискорень і вібрацій та інше. Для перевірки алгоритмів компенсації температурних похибок ММГ складемо наступну модель вихідного сигналу [25]:

$$U_{\omega z} = k_{zT} \cdot \omega_z + U_{z0T} + b_z \cdot a_z + n_{\omega z} \quad (2.2)$$

де:  $k_{zT}$  – скомпенсований на поточній температурі масштабний коефіцієнт;  $\omega_z$  – проекція абсолютної кутової швидкості обертання  $\omega$  на вісь чутливості;  $U_{z0T}$  – скомпенсоване на поточній температурі зміщення нуля;  $b_z$  – коефіцієнт чутливості нульового сигналу до прискорень (так званий «дрейф від g»);  $a_z$  – проекція уявного прискорення на вісь чутливості;  $n_{\omega z}$  – шум вимірювання.

При цьому  $k_{zT}$  та  $U_{z0T}$  залежать як від поточної температури, так і від швидкості та напрямку її зміни:

$$\begin{aligned} k_{zT} &= f\left(\lambda, T, \Delta T, \frac{\partial T}{\partial t}\right) \\ U_{z0T} &= f\left(\zeta, T, \Delta T, \frac{\partial T}{\partial t}\right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

де:  $\lambda, \zeta$  – відповідні значення коефіцієнтів.

## 2.2 Методи апроксимації температурних залежностей ММГ поліномом

При використанні вихідних сигналів ДКШ, температурні залежності їх параметрів на практиці апроксимуються простими функціями від температури [12]. Проте кожен з методів має свої недоліки та переваги, які визначаються точністю апроксимації від якої залежить точність компенсації дрейфів, складність реалізації на ЕОМ, швидкості обчислень та інше. Для аналізу обрано наступні методи апроксимації функцій: метод локальної та глобальної інтерполяції, апроксимація методом найменших квадратів (МНК).

### 2.2.1 Метод локальної інтерполяції

Задачею інтерполювання функції  $y = f(x)$  є визначення її значень при будь-яких значеннях аргументу  $x \in [x_0, x_n]$  що не співпадають з його вузловими значеннями [26].

Найпростішим і часто використовуваним видом інтерполяції температурних залежностей є локальна лінійна (або кусково-лінійна) інтерполяція. Вона полягає в тому, що вузлові точки з'єднуються відрізками прямих (рис. 2.1), тобто через кожні дві точки проводиться пряма (поліном першого степеня) яка має вигляд [26]:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot x \quad (2.4)$$

при  $x_{i-1} \leq x \leq x_i$ .

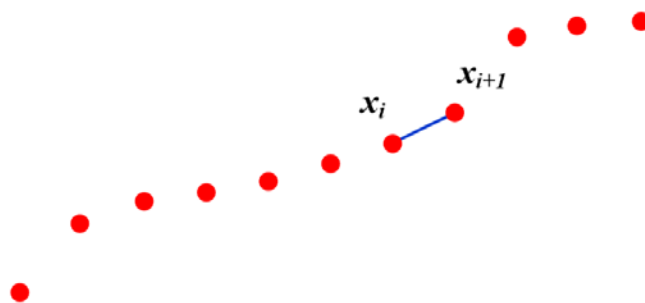


Рис. 2.1. Кусково-лінійна інтерполяція

При цьому коефіцієнти  $a_0$  і  $a_1$  різні на кожному інтервалі  $[x_{i-1}, x_i]$  і розраховуються наступним чином:

$$\begin{cases} f_{i-1} = a_0 + a_1 \cdot x_{i-1} \\ f_i = a_0 + a_1 \cdot x_i \end{cases} \quad (2.5)$$

З рівняння (2.5) можна знайти коефіцієнти:

$$a_0 = f(x_{i-1}) - a_1 \cdot x_{i-1}, \quad a_1 = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \quad (2.6)$$

Використовуючи даний метод для компенсації температурних дрейфів ММГ, необхідно весь температурний діапазон розбити на ділянки, кількість яких залежить від кількості температур калібрування, та розрахувати коефіцієнти окремо для кожного параметра моделі вихідного сигналу, тобто для зміщення нуля та масштабного коефіцієнту. Тоді рівняння (2.1) можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} U_0(T_i) &= \alpha_0 + \alpha_1 \cdot T_i \\ k(T_i) &= \beta_0 + \beta_1 \cdot T_i \end{aligned} \quad (2.7)$$

де:  $T_i$  – поточна температура температурного датчика.

Так для калібрування ММГ при  $n$  значеннях температури, отримають  $n$  номінальних значень зміщення нуля  $U_{0_1}, U_{0_2}, \dots, U_{0_n}$  та масштабних коефіцієнтів  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , які відповідають  $n$  значенням температури  $T_1, T_2, \dots, T_n$ . Підставивши отримані значення в (2.6) розраховують коефіцієнти поліномів (2.7) для  $n-1$  лінійних ділянок  $T_2 - T_1, T_3 - T_2, \dots, T_{n-1} - T_n$ .

Для вирішення задачі компенсації номінальні значення параметрів моделі, номінальні значення температури та розраховані коефіцієнти чутливості зберігаються в пам'яті ЕОМ. Під час роботи IBM спочатку потрібно визначити інтервал, в який потрапляє поточне значення температури  $T_i$ , а потім підставити його в вираз (2.7), використовуючи коефіцієнти поліному для даного інтервалу.

### 2.2.2 Метод глобальної інтерполяції

Недоліком кусково-лінійної інтерполяції є її «негладкість», яка проявляється при достатньо нелінійній температурній залежності. В цьому випадку в районі температурної точки, яка є спільною для двох відрізків з різними нахилами, з'являється злам інтерполяційної лінії [12].

Цих недоліків позбавлені методи глобальної інтерполяції при яких будується єдиний поліном на всьому температурному інтервалі, який проходить через температурні точки калібрування.

Використаємо для поставленої задачі інтерполяційний многочлен Лагранжа вигляду [26]:

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i \cdot l_i(x) \quad (2.8)$$

де:  $l_i(x)$  - базисні многочлени Лагранжа степеня  $n$ :

$$l_i(x) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0)(x_i - x_1) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)} \quad (2.9)$$

Тобто многочлен можна записати у вигляді:

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (2.10)$$

При цьому многочлен  $l_i(x)$  має задовільнити умову:

$$l_i(x_j) = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (2.11)$$



З умови (2.8) видно, що многочлен рівний нулю при кожному  $x_j$  окрім  $x_i$ , тобто  $x_0, x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n$  - корені многочлена. Таким чином, степінь многочлена  $L_n(x)$  буде дорівнювати  $n$  і при  $x \neq x_i$  всі складові суми рівні нулю, крім складової з номером  $i = j$ , рівній  $y_i$  [26]

Многочлен Лагранжа в звичайному вигляді містить значення функцій у вузлах інтерполяції, тому він зручний, коли значення функції змінюється, а вузли інтерполяції незмінні [27].

Застосуємо даний метод для компенсації температурних похибок ММГ.

Перепишемо вираз (2.10) в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} U_0(T_i) &= \sum_{k=0}^n U_{0_{T_k}} \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \frac{T_i - T_j}{T_k - T_j} \\ k(T_i) &= \sum_{k=0}^n k_{T_k} \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \frac{T_i - T_j}{T_k - T_j} \end{aligned} \quad (2.12)$$

де:  $T_i$  – поточна температура температурного датчика;  $U_{0_{T_k}}$ ,  $k_{T_k}$  – номінальні значення зміщення нуля та масштабного коефіцієнта при температурі  $T_k$  визначені під час калібрування.

З врахуванням єдності базисних поліномів для інтерполювання  $U_{0_{T_k}}$  та  $k_{T_k}$  перепишемо вираз (2.12) в матричній формі, що зменшить об'єм обчислень:

$$\begin{bmatrix} U_0(T_i) \\ k(T_i) \end{bmatrix} = \sum_{k=0}^n \begin{bmatrix} U_{0_{T_k}} \\ k_{T_k} \end{bmatrix} \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \frac{T_i - T_j}{T_k - T_j} \quad (2.13)$$

Проте навіть така форма запису досить складна і громіздка, адже поліном  $L_n(x)$  будується для всіх вузлів сітки. Враховуючи, що потрібно розраховувати не загальний многочлен  $L_n(x)$ , а лише його значення при конкретних  $x_i$ , тобто необхідно вирішити задачу обчислення окремих наближених значень функції за допомогою відповідним їм значенням інтерполяційного багаточлена Лагранжа  $L_n(x)$  застосовують інтерполяційну схему Ейткена [27]. Організація обчислень за цією схемою матиме

ітераційний характер, кожен крок якої полягає в обчисленні деякого визначника другого порядку. Розглянемо метод більш детально [27].

Нехай задано дві точки  $(x_0, y_0)$  та  $(x_1, y_1)$  функції  $y = f(x)$ . Побудуємо функцію  $P_{0,1}(x)$ :

$$P_{0,1}(x) = \frac{\begin{vmatrix} x - x_0 & y_0 \\ x - x_1 & y_1 \end{vmatrix}}{x_1 - x_0} = \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} y_1 = L_1(x) \quad (2.14)$$

З (2.14) видно, що  $P_{0,1}(x)$  співпадає з інтерполяційним многочленом Лагранжа першого степеня побудованого за двома точками. Побудуємо через визначник функцію  $P_{1,2}(x)$  для точок  $(x_1, y_1)$  та  $(x_2, y_2)$ :

$$P_{1,2}(x) = \frac{\begin{vmatrix} x - x_1 & y_1 \\ x - x_2 & y_2 \end{vmatrix}}{x_2 - x_1} = \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} y_2 \quad (2.15)$$

Вона теж є многочленом Лагранжа першої степені, побудованим за двома даними точками.

Якщо на кривій  $y = f(x)$  задані три точки  $(x_0, y_0)$ ,  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ , то використовуючи введені лінійні функції  $P_{0,1}(x)$  та  $P_{1,2}(x)$  побудуємо нову функцію:

$$P_{0,1,2}(x) = \frac{\begin{vmatrix} x - x_0 & P_{0,1}(x) \\ x - x_2 & P_{1,2}(x) \end{vmatrix}}{x_2 - x_0} \quad (2.16)$$

Покажемо, що ця функція є многочленом 2-го степеня. Враховуючи, що:

$$P_{0,1}(x_0) = P_{1,2}(x_1) = y_0, \quad P_{0,1}(x_1) = y_1, \quad P_{1,2}(x_2) = y_2 \quad (2.17)$$

підставляючи в  $P_{0,1,2}(x)$  по черзі значення  $x = x_0, x_1, x_2$  отримаємо:

$$P_{0,1,2}(x_0) = y_0; \quad P_{0,1,2}(x_1) = y_1; \quad P_{0,1,2}(x_2) = y_2 \quad (2.18)$$

Тобто, функція  $P_{0,1,2}(x)$  – це многочлен другої степені, який вирішує задачу параболічної інтерполяції по трьох точках  $(x_0, y_0)$ ,  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ . Виходячи з того, що

такий многочлен єдиний, робимо висновок, що  $P_{0,1,2}(x) = L_2(x)$ , де  $L_2(x)$  – многочлен Лагранжа.

Продовжуючи даний процес далі, отримаємо послідовність інтерполяційних многочленів Лагранжа, яка становить суть інтерполяційної схеми Ейткена

$$f(x) \approx P_{0,1,\dots,i}(x) = \frac{\begin{vmatrix} x - x_0 & P_{0,1,\dots,i-1}(x) \\ x - x_i & P_{1,2,\dots,i}(x) \end{vmatrix}}{x_i - x_0} \quad (2.19)$$

### 2.2.3 Метод апроксимації поліномом

Проаналізувавши методи інтерполяції для компенсації температурних дрейфів ММГ можна зробити висновки, що їх перевагами, насамперед, є:

- 1) У випадку глобальної інтерполяції не потрібно задавати вигляд аналітичної функції. Крім того базисні поліноми є однаковими для всіх параметрів ММГ, що спрощує алгоритм компенсації.
- 2) Простота реалізації в обчислювальній техніці.

Недоліками методів інтерполяції є :

- 1) Необхідність збільшувати кількість температур калібрування для досягнення необхідної точності компенсації при достатньо нелінійній залежності параметрів моделі від температури.
- 2) У випадку локальної інтерполяції отримують декілька інтерполуючих функцій, з якими незручно працювати.
- 3) У випадку глобальної інтерполяції при збільшенні вузлів (температур калібрування) отримують досить складну і громіздку інтерполуючу функцію, що призводить до збільшення кількості арифметичних операцій, що навантажує обчислювач.
- 4) Якщо отримані в процесі температурного калібрування дані мають випадкові відхилення, то інтерполуючий поліном також буде мати ці відхилення, що призведе до похибок компенсації.



Перепишемо систему (2.21) у матричній формі [27]:

$$Y = X \cdot A \quad (2.22)$$

де:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}_{n \times 1}; \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^m \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^m \end{bmatrix}_{n \times m}; \quad A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (2.23)$$

Рішення системи рівнянь зводиться до знаходження значень елементів стовпця невідомих  $A$  (коренів системи) по відомим  $Y$  і  $X$ .

Зазвичай в системі (2.21) кількість рівнянь більше кількості невідомих ( $m < n$ ), тобто система стає перевизначеною і не має єдиного точного рішення, але можна знайти «оптимальний» вектор  $A$ . Для вирішення такої системи використовується метод найменших квадратів (МНК). За допомогою цього методу коефіцієнти апроксимуючої функції обчислюються таким чином, щоб середньоквадратичне відхилення експериментальних даних від знайденої апроксимуючої функції (сума квадратів відхилень між векторами  $X \cdot A$  і  $Y$  рівняння (2.22) було найменшим [26]:

$$\sum_i \varepsilon_i^2 = \sum_i (y_i - f(x_i))^2 \rightarrow \min \quad (2.24)$$

де:  $\varepsilon_i = y_i - f(x_i)$ .

Для розв'язку системи рівнянь (2.21) МНК перепишемо вираз (2.22), з додаванням вектора похибки  $\varepsilon$  [26]:

$$Y + \varepsilon = X \cdot A \quad (2.25)$$

Тепер завдання зводиться до мінімізації квадрата норми вектора похибки  $\varepsilon$ :

$$\sum_i \varepsilon_i^2 = \|\varepsilon\|^2 = \varepsilon^T \cdot \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & \varepsilon_2 & \dots & \varepsilon_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \rightarrow \min \quad (2.26)$$

Таким чином з рівняння (2.25):

$$\varepsilon^T \cdot \varepsilon = (X \cdot A - Y)^T \cdot (X \cdot A - Y) \rightarrow \min \quad (2.27)$$

Перетворимо праву частину виразу (2.27):

$$X^T \cdot A^T \cdot X \cdot A - 2 \cdot X^T \cdot A^T \cdot Y + Y^T \cdot Y \rightarrow \min \quad (2.28)$$

Для знаходження мінімуму необхідно обчислити часткову похідну по  $A$  рівняння (2.28) і прирівняти її до 0:

$$\frac{\partial \varepsilon^T \cdot \varepsilon}{\partial A} = 2 \cdot X^T \cdot X \cdot A - 2 \cdot X^T \cdot Y = 0 \quad (2.29)$$

Визначимо з (2.29)  $A$ :

$$A = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (2.30)$$

Таким чином, МНК зводиться до знаходження оберненої матриці.

Алгоритм компенсації температурних дрейфів ММГ з використанням апроксимації МНК має таку послідовність:

- 1) Вибір степеня апроксимуючих поліномів для масштабного коефіцієнта  $k$  та зміщення нуля  $U_0$ :

$$\begin{aligned} U_0 &= \alpha_0 + \alpha_1 \cdot T + \alpha_2 \cdot T^2 + \dots + \alpha_m \cdot T^m \\ k &= \beta_0 + \beta_1 \cdot T + \beta_2 \cdot T^2 + \dots + \beta_m \cdot T^m \end{aligned} \quad (2.31)$$

- 2) Визначення відповідних коефіцієнтів поліномів (2.31) методом найменших квадратів використовуючи експериментальні дані отримані в процесі температурного калібрування.
- 3) Розрахунок в обчислювачі  $k$  та  $U_0$  з врахуванням поточної температури  $T_i$ :

$$\begin{aligned} U_0(T_i) &= \alpha_0 + \alpha_1 \cdot T_i + \alpha_2 \cdot T_i^2 + \dots + \alpha_m \cdot T_i^m \\ k(T_i) &= \beta_0 + \beta_1 \cdot T_i + \beta_2 \cdot T_i^2 + \dots + \beta_m \cdot T_i^m \end{aligned} \quad (2.32)$$

Теоретично, більш складна апроксимуюча функція може точніше описати реальну залежність параметрів ММГ від температури, і, відповідно, точніше компенсувати цю залежність [12]. Однак при застосуванні апроксимації МНК варто звернути увагу, що при виборі апроксимуючого поліному високих степенів (вище 5-

го) може виникнути явище поліноміального розгойдування (осциляції), що значно збільшує вірогідність помилки компенсації дрейфу ММГ, а також знижується достовірність і повторюваність коефіцієнтів [18]. Крім того більш складна апроксимуюча функція збільшує об'єм обчислень та потребує більшої кількості температур, що значно збільшує час калібрування [18, 28].

## **2.3 Алгоритми компенсації температурних дрейфів ММГ штучними нейронними мережами**

Недоліками всіх класичних методів апроксимації є їх строгість, тобто наперед заданий вигляд апроксимуючої функції не може врахувати реальні властивості системи, що при несуттєвих змінах вхідних параметрів призводить до похибок приближення. Сучасні засоби апроксимації, такі як штучні нейронні мережі дозволяють більш точно побудувати регресійну модель, яка буде нечутлива до випадкових відхилень.

Штучна нейронна мережа - це система, яка складається з багатьох простих обчислювальних елементів, що працюють паралельно, функція яких визначається структурою мережі, силою взаємопов'язаних зв'язків, а обчислення проводяться в самих елементах або вузлах [30]. Задачі, які вирішують ШНМ, зводяться до апроксимації багатовимірних функцій, тобто побудови відображення  $F : x \rightarrow y$ .

Для компенсації температурних дрейфів ММГ пропонується алгоритм на основі ШНМ. В роботі розглядаються ШНМ прямого поширення сигналу двох типів: зворотного поширення помилки (ЗПП) та радіальних базисних функцій (РБФ), які найкраще підходять для апроксимації даних.

Назва мереж вказує на те, що в них існує виділений напрям поширення сигналів, які рухаються, починаючи з входу, через один або декілька прихованих шарів до вихідного шару.

### **2.3.1 Штучна нейронна мережа зворотного поширення помилки**

Для побудови алгоритму компенсації дрейфів ММГ, розглянемо основні поняття пов'язані з роботою ШНМ.

Модель обчислювального елементу (нейрон) в найпростішому варіанті можна зобразити наступним чином (рис. 2.3) [29]:

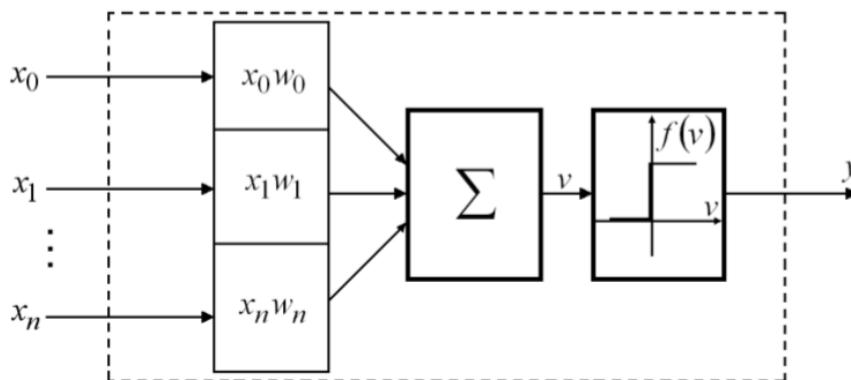


Рис. 2.3. Модель штучного нейрона

тут показано:  $w_i$  – ваги синапса  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $x_i$  – компонент вхідного вектора (вхідний сигнал)  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $y$  – вихідний сигнал нейрона;  $f(v)$  – функція активації (передавальна функція);  $v$  – аргумент активаційної функції

Кожен нейрон отримує вхідні сигнали  $(x_0, x_1, \dots, x_n)$  (вихідні дані або вихідні сигнали інших нейронів ШНМ) через кілька вхідних каналів. Кожен вхідний сигнал проходить через з'єднання (синапси), які мають певну інтенсивність (синаптична вага  $w_0, w_1, \dots, w_n$ ). Одержані сигнали подаються на вхід суматора, який виконує їх обробку за формулою [30]:

$$v = \sum_{i=0}^n w_i x_i \quad (2.33)$$

Для практичного застосування модель (2.33) доповнюється «нейроном зміщення», який дозволяє збуджуватися нейрон тільки у випадку, якщо вхідна величина перевищить певне порогове значення. Без такого зміщення ШНМ не зможе функціонувати, тому повна модель нейрона має такий вигляд:

$$v = \sum_{i=0}^n w_i x_i + b \quad (2.34)$$



де:  $b$  – нейрон зміщення.

в результаті чого отримується сигнал активації нейрона, який перетворюється за допомогою функції активації (передавальної функції):

$$y = f(v) \quad (2.35)$$

У сучасній літературі зустрічається велика кількість парадигм ШНМ, елементи яких реалізують різні активаційні функції. Найбільш поширеними функціями активації є: порогова, логістична, гіперболічний тангенс, лінійна, радіальна базисна та ін. Як правило, передавальні функції всіх нейронів в мережі фіксовані, а ваги є параметрами мережі і можуть змінюватися [30].

Крім вхідних і вихідних нейронів мережа може мати проміжні (приховані) нейрони, які виконують внутрішні функції. Вхідні, приховані і вихідні нейрони повинні бути пов'язані між собою. Будь який прихований або вихідний нейрон багат шарової ШНМ може виконувати два типи обчислень [29]:

- обчислення функціонального сигналу на виході нейрону, яке реалізовано у вигляді неперервної функції від вхідного сигналу і синаптичних ваг, зв'язаних з даним нейроном;

- обчислення оцінки вектора градієнта (тобто градієнта поверхні помилки по синаптичним вагам, зв'язаних зі входами даного нейрону) необхідного для зворотного поширення через мережу.

Найбільш поширеними є багат шарові мережі, в яких нейрони об'єднані в шари. Шар - це сукупність нейронів, на які в кожен момент часу паралельно надходить інформація від інших нейронів мережі. Після того, як визначено число шарів і число елементів в кожному з них, потрібно знайти значення для ваг і зміщень мережі, які б мінімізували помилку прогнозу нейронною мережею. Для вирішення цієї задачі застосовують методи навчання ШНМ. Помилка для конкретної конфігурації мережі визначається шляхом прогону через мережу всіх наявних навчальних даних і порівняння її вихідного сигналу з бажаними (цільовими) значеннями. Всі такі різниці підсумовуються в функцію помилок, значення якої і є

помилка мережі. В якості функції помилок найчастіше застосовується сума квадратів помилок [30]:

$$E(w) = \sum_i (d_i - y_i)^2 \quad (2.36)$$

де:  $d_i$  – бажаний вихід мережі;  $y_i$  – реальний вихід мережі.

Найпоширеніший варіант алгоритму навчання ШНМ - так званий алгоритм зворотного поширення помилки (ЗПП).

Застосуємо ШНМ в алгоритмі компенсації температурних дрейфів ММГ.

Вирішення конкретної задачі нейромережевим методом включає декілька основних етапів: збір і підготовка даних, створення ШНМ, її навчання та моделювання (використання ШНМ для поставленої задачі).

Враховуючи різну аналітичну залежність основних параметрів моделі вихідного сигналу ММГ від температури, доцільно використовувати окремі ШНМ для компенсації  $U_0$  та  $k$ . Архітектура ШНМ для цих параметрів буде ідентичною, так як кількість входів, виходів та розмірність навчальної вибірки однакова, тому розглянемо ШНМ на прикладі компенсації зміщення нуля  $U_0$ .

Розробимо архітектуру ШНМ.

Входом ШНМ є поточна температура температурного датчика ММГ, виходом – скомпенсоване по температурі значення зміщення нуля.

Згідно з теоремою Хехт-Нільсена та її наслідків про представлення функції багатьох змінних достатньо двошарової ШНМ з прямими зв'язками з  $n$  нейронами вхідного шару,  $(2n+1)$  нейронами прихованого шару з заздалегідь відомими однаковими функціями активації (сигмоїдними) і  $m$  нейронами вихідного шару з невідомими функціями активації, яка для кожного вхідного вектора формує відповідний йому вихідний вектор. [31].

Для оцінки числа нейронів в прихованому шарі нейронних мереж можна скористатися формулою для оцінки необхідного числа синаптичних ваг в багатошаровій мережі з сигмоїдними функціями активації [31]:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \cdot \left( \frac{N}{m} + 1 \right) \cdot (n + m + 1) + m \quad (2.37)$$

де:  $n$  – розмірність вхідного сигналу;  $m$  – розмірність вихідного сигналу;  $N$  – число елементів навчальної вибірки;  $L_w$  – кількість синаптичних ваг.

Оцінивши необхідне число ваг, можна розрахувати число нейронів в прихованих шарах. Наприклад, для двошарової мережі це число складе:

$$L = \frac{L_w}{n + m} \quad (2.38)$$

Таким чином для мережі з одним входом ( $n = 1$ ) та одним виходом ( $m = 1$ ), кількістю даних в навчальній вибірці рівною кількості температур калібрування (наприклад  $N = 3$ ) необхідна кількість ваг розрахована за формулою (2.36) знаходиться в діапазоні  $2 \leq L_w \leq 13$ . Тоді кількість нейронів в прихованому шарі з формули (2.37)  $1 \leq L \leq 7$ .

Експериментальним шляхом (див. розділ 3) було встановлено, що найкраща апроксимація, тобто при якій не відбувається перенавчання нейронної мережі (апроксимуюча функція проходить точно через всі точки навчальної вибірки даних), але при цьому зберігається властивість до узагальнення (властивість отримувати обґрунтований результат на основі даних, які не зустрічалися при навчанні), досягається при трьох нейронах в прихованому шарі.

Функція активація для нейронів прихованого шару згідно теореми Хехт-Нільсена повинна належати до класу сигмоїд, а з врахуванням обраного алгоритму навчання повинна володіти декількома важливими характеристиками: безперервністю, диференційованістю і бути монотонно зростаючою. Більш того, задля ефективності обчислень, бажано, щоб її похідна легко знаходилася. Найчастіше, активаційна функція також є функцією з насиченням, тому використаємо логістичну функцію з областю значень в  $(0, 1)$  визначену як:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{1 + e^{-x}} \\ f'(x) &= f(x) \cdot [1 - f(x)] \end{aligned} \quad (2.39)$$

Графік такої функції зображено на рис. 2.4.

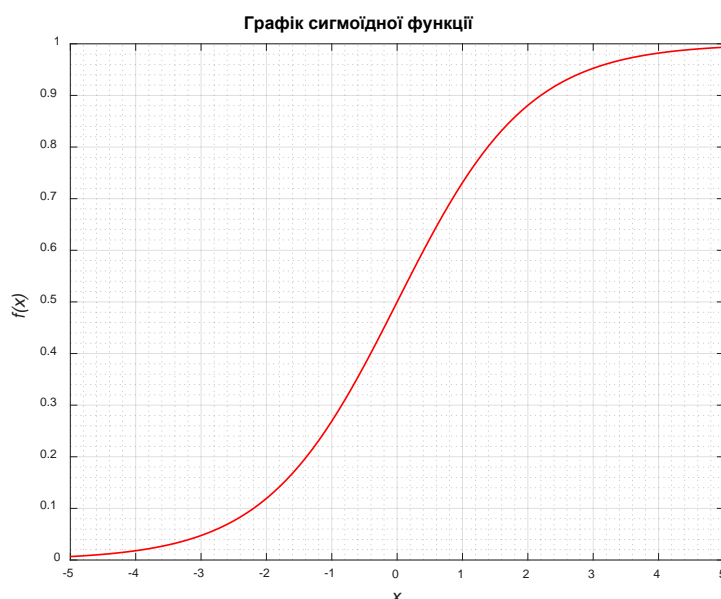


Рис. 2.4. Графік сигмоїдальної логістичної функції

У вихідному шарі доцільно використовувати лінійну функцію активації, так як вона найкращим чином відповідає сутності даної задачі. Така функція визначена в області значень  $(-\infty, \infty)$ , що дозволяє використовувати значення поточної температури на вході, отримати значення зміщення нуля без нормалізації та денормалізації при використанні інших функцій, які визначені в області значень  $(-1, 1)$ ):

$$\begin{aligned} f(x) &= cx \\ f'(x) &= c \end{aligned} \quad (2.40)$$

Архітектура розробленої ШНМ зображена на рис. 2.5.

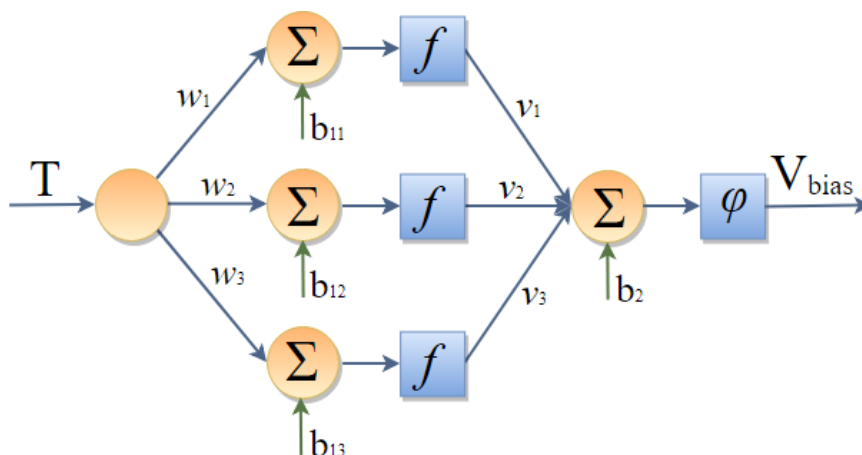


Рис. 2.5. Архітектура ШНМ зворотного поширення помилки для компенсації температурних дрейфів ММГ

де:  $T$  – поточна температура термодатчика;  $V_{bias}$  – розраховане зміщення нуля ММГ;  $w_j$  – синаптичні ваги  $j$ -го нейрона прихованого шару;  $v_k$  – синаптичні ваги вихідного нейрона;  $b_{1j}$ ,  $b_2$  – нейрони зміщення прихованого та вихідного шарів;  $f$  – сигмоїдальна логістична передавальна функція;  $\varphi$  – лінійна передавальна функція.

Для реалізації на ЕОМ роботу такої ШНМ можна представити виразом:

$$V_{bias} = \varphi \left( \sum_{k=1}^3 f(w_k \cdot T + b_{1k}) + b_2 \right) = \sum_{k=1}^3 \frac{1}{1 + e^{-(w_k \cdot T + b_{1k})}} + b_2 \quad (2.41)$$

Після того, як розроблено архітектуру ШНМ необхідно виконати етап навчання, в процесі якого визначаються синаптичні ваги нейронів.

Для навчання ШНМ використовуються пари “температура-зміщення нуля” та “температура-масштабний коефіцієнт” отримані в результаті температурного калібрування.

Розглянемо алгоритм навчання ШНМ метод зворотного поширення помилки.

Ведемо наступні позначення:

$i, j, k$  - індекси нейрона вхідного, нейрона прихованого та нейрона вихідного шару відповідно;

$x_i$  - елемент вхідного вектора;

$\tilde{y}_k$  - елемент вихідного вектора;

$y_k$  - елемент цільового вектора;

$X = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$  - вхідний вектор сигналів;

$y = (y_1, \dots, y_k, \dots, y_z)$  - вектор цільових значень;

$\tilde{y} = (\tilde{y}_1, \dots, \tilde{y}_k, \dots, \tilde{y}_z)$  - вихідний вектор сигналів ШНМ;

$w_{ij}$  - ваговий коефіцієнт в прихованому шарі;

$v_{jk}$  - ваговий коефіцієнт у вихідному шарі;

$t_j$  - аргумент активаційної функції нейрона прихованого шару;

$h_j$  - елемент вихідного вектора прихованого шару;

$s$  - аргумент активаційної функції нейрона вихідного шару;

$f(t)$  - активаційна функція нейронів прихованого шару;

$\varphi(s)$  - активаційна функція нейронів вихідного шару;

$w_{0j}$  - зміщення  $j$ -го нейрона в прихованому шарі;

$w_{0k}$  - зміщення  $k$ -го нейрона в вихідному шарі;

$\eta$  - коефіцієнт швидкості навчання.

Нехай дано навчальну вибірку  $\Psi = \left\{ \left( X^{(n)}, y^{(n)} \right) \right\}_{n=1}^N$ , що містить  $N$  пар:  $X^{(n)}$ ,  $y^{(n)}$

відповідно вхідних і вихідних векторів та множину параметрів  $W = \{w, v\}$  яка складається з параметрів нейронів прихованого шару  $w$  і параметрів вихідного шару  $v$ . Метод зворотного поширення полягає в мінімізації цільової функції  $E$  [29]:

$$E = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \left[ y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)}(x) \right]^2 \quad (2.42)$$

Для параметра  $v_j$  одержимо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial v_j} &= -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)} \right) \frac{\partial \tilde{y}^{(n)}}{\partial v_j} = \\ &= -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)} \right) \varphi' \left( s^{(n)} \right) \frac{\partial s^{(n)}}{\partial v_j} = \\ &= -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)} \right) \varphi' \left( s^{(n)} \right) h_j \end{aligned} \quad (2.43)$$

Крок зміни вагових коефіцієнтів вихідного шару дорівнює:

$$\Delta v_j = -\eta \frac{\partial E}{\partial v_j} = \frac{\eta}{N} \sum_{n=1}^N \left( y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)} \right) \varphi' \left( s^{(n)} \right) h_j \quad (2.44)$$

Визначимо частинну похідну по  $w_{ij}$ :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} &= -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)} \right) \frac{\partial \tilde{y}^{(n)}}{\partial w_{ij}} = \\
&= -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)} \right) \varphi' \left( s^{(n)} \right) v_j \frac{\partial h_j^{(n)}}{\partial w_{ij}} = \\
&= -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)} \right) \varphi' \left( s^{(n)} \right) v_j f' \left( t_j^{(n)} \right) \frac{\partial t_j^{(n)}}{\partial w_{ij}} = \\
&= -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)} \right) \varphi' \left( s^{(n)} \right) v_j f' \left( t_j^{(n)} \right) x_i^{(n)}
\end{aligned} \tag{2.45}$$

Крок зміни вагових коефіцієнтів прихованого шару:

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \frac{\eta}{N} \sum_{n=1}^N \left( y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)} \right) \varphi' \left( s^{(n)} \right) v_j f' \left( t_j^{(n)} \right) x_i^{(n)} \tag{2.46}$$

Зробивши заміни:

$$\begin{aligned}
\delta^{(n)} &= \left( y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)} \right) \varphi' \left( s^{(n)} \right) \\
\delta_j^{(n)} &= \delta^{(n)} f' \left( t_j^{(n)} \right)
\end{aligned} \tag{2.47}$$

спростимо формули для визначення кроків зміни параметрів прихованого та вихідного шарів:

$$\begin{aligned}
\Delta v_j &= \frac{\eta}{N} \sum_{n=1}^N \delta^{(n)} h_j^{(n)} \\
\Delta w_{ij} &= \frac{\eta}{N} \sum_{n=1}^N \delta_j^{(n)} x_i^{(n)}
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Для обчислення чергового кроку параметра  $\Delta W$  за даним алгоритмом необхідно виконати обробку всієї навчальної вибірки  $\Psi$ .

Ознакою закінчення процесу навчання може бути досягнення умови  $\frac{\partial E}{\partial W} \leq \varepsilon$

або мінімальна зміна цільової функції  $ABS \left( \frac{E(t+1) - E(t)}{E(t)} \right) < \varepsilon$ , де  $\varepsilon > 0$  — значення

порогу точності.

Ідея методу градієнтного спуску полягає в послідовній зміні параметрів ШНМ в напрямку, що забезпечує зменшення цільової функції  $E$ . Оскільки функція  $E$  диференційовна по кожному з параметрів, то існує можливість обчислення градієнтного вектора. Рухаючись у напрямку від'ємного градієнта по кожному з параметрів, знаходимо локальні мінімуми цільової функції [29].

Алгоритм навчання для реалізації в мікропроцесорній техніці можна описати наступним чином [32]:

- 1) Ініціалізація значень ваг (ваги всіх зв'язків ініціалізуються випадковими невеликими значеннями).
- 2) До тих пір поки умова припинення роботи алгоритму невірна, виконуються кроки 3 - 10.
- 3) Для кожної пари значень {дані, цільове значення} виконуються кроки 3 - 8.
- 4) Кожен вхідний нейрон відправляє отриманий сигнал всім нейронам в наступному шарі (прихованому).
- 5) Кожен прихований нейрон підсумовує зважені вхідні сигнали і застосовує активаційну функцію:

$$t_j = \sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + w_{0j}$$

$$h_j = f(t_j)$$
(2.49)

після чого відправляє результат всім елементам вихідного шару.

- 6) Кожен вихідний нейрон підсумовує зважені вхідні сигнали і застосовує активаційну функцію, обчислюючи вихідний сигнал:

$$s_k = \sum_{j=1}^m v_{jk}h_j + w_{0k}$$

$$\tilde{y}_k = \varphi(s_k)$$
(2.50)

- 7) Кожен вихідний нейрон отримує цільове значення  $y_k$  - те вихідне значення, яке є правильним для даного вхідного сигналу, і обчислює помилку:

$$\delta_k = (y_k - \tilde{y}_k) \cdot \varphi'(s_k)$$
(2.51)

Після чого обчислює величину, на яку зміниться вага зв'язку  $v_{jk}$ :



$$\Delta v_{jk} = \mu \cdot \delta_k \cdot h_j \quad (2.52)$$

Крім цього, обчислює величину коригування зміщення  $w_{0k}$ :

$$\Delta w_{0k} = \mu \cdot \delta_k \quad (2.53)$$

і посиляє  $\delta_k$  нейронам в попередньому шарі.

- 8) Кожен прихований нейрон підсумовує вхідні помилки (від нейронів в наступному шарі і обчислює величину помилки:

$$\delta_j = \sum_{k \in I} \delta_k \cdot v_{jk} \cdot f'(t_j) \quad (2.54)$$

та обчислює величину, на яку зміниться вага зв'язку  $w_{ij}$  та зміщення  $w_{0j}$ :

$$\begin{aligned} \Delta w_{ij} &= \mu \cdot \delta_j \cdot x_i \\ \Delta w_{0j} &= \mu \cdot \delta_j \end{aligned} \quad (2.55)$$

- 9) Кожен вихідний нейрон змінює ваги своїх зв'язків з елементом зміщення і прихованими нейронами:

$$v_{jk}(t+1) = v_{jk}(t) + \Delta v_{jk}(t) \quad (2.56)$$

Кожен прихований нейрон змінює ваги своїх зв'язків з елементом зміщення і вихідними нейронами:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}(t) \quad (2.57)$$

- 10) Перевірка умови припинення роботи алгоритму.

По завершенню процесу навчання ШНМ повинна коректно перетворювати вхідне значення поточної температури ЧЕ у відповідне вихідне значення зміщення нуля та масштабного коефіцієнту, причому це перетворення задається значеннями ваг мережі. Таким чином здійснюється компенсація температурного дрейфу ММГ.

### ***2.3.2 Штучна нейронна мережа радіальних базисних функцій***

Штучні нейронні мережі, які використовують радіальні базисні функції (РБФ), є окремим випадком двошарових ШНМ прямого поширення, в яких прихований шар нейронів використовує радіальні базисні функції вигляду [29]:

$$\varphi(x) = \varphi(\|x - c\|) \quad (2.58)$$

Найчастіше в якості радіальної функції застосовується функція Гаусса (рис. 2.6).

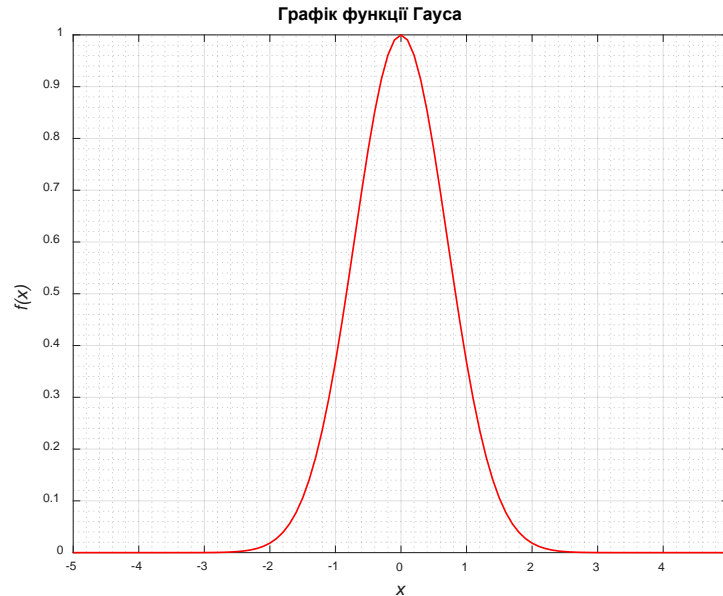


Рис. 2.6. Графік функції Гаусса

При розміщенні її центру в точці  $c_i$  вона може бути визначена як [33]:

$$\varphi(x) = \varphi(\|x - c_i\|) = \exp\left[-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (2.59)$$

де:  $\sigma_i$  – параметр, від значення якого залежить ширина розмаху функції.

Структура РБФ-мереж включає вхідний шар, на який подаються сигнали, які описуються вхідним вектором  $x$ , прихований шар з нейронами радіального типу і вихідний шар, що складається, як правило, з одного або декількох лінійних нейронів. Функція вихідного нейрона зводиться виключно до зваженого підсумовування сигналів, що генеруються прихованими нейронами [33].

Якщо обмежитися  $n$  базисними функціями, то задачу апроксимації можна представити у вигляді:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \varphi(\|x - c_i\|) \quad (2.60)$$

де:  $n < p$ , а  $c_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) – множина центрів, які необхідно визначити.

Для практичної реалізації РБФ-мереж, як і у випадку з ШНМ зворотного поширення похибки вводиться нейрон зміщення  $b_i$ , який дозволяє масштабувати різницю  $\|x - c_i\|$ , тобто корегувати чутливість нейрона в прихованому шарі. Перепишемо вираз (2.60) з врахуванням таких зміщень:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \varphi(\|x - c_i\| \cdot b_i) \quad (2.61)$$

Задача апроксимації РБФ-мережею полягає в підборі відповідної кількості радіальних функцій і їх властивостей, а також в такому підборі ваг ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), щоб рішення рівняння (2.59) було достатньо точним [33].

Підбір параметрів радіальних функцій і значень ваг мережі можна звести до мінімізації цільової функції, яку можна записати в такій формі:

$$E = \sum_{i=1}^p \left[ \sum_{j=1}^n w_j \cdot \varphi(\|x - c_j\| \cdot b_j) - t_i \right]^2 \quad (2.61)$$

де:  $n$  – кількість радіальних нейронів;  $p$  – кількість навчальних пар  $(x, t)$ , де  $x$  - це вхідний вектор, а  $t$  - відповідна йому очікувана величина.

Процес навчання РБФ-мереж включає дві стадії: процес налаштування центрів базисних функцій і навчання нейронів в прихованому шарі, тому ці мережі навчаються досить швидко [29].

Архітектура такої мережі для температурної компенсації зміщення нуля ММГ зображена на рис. 2.7.

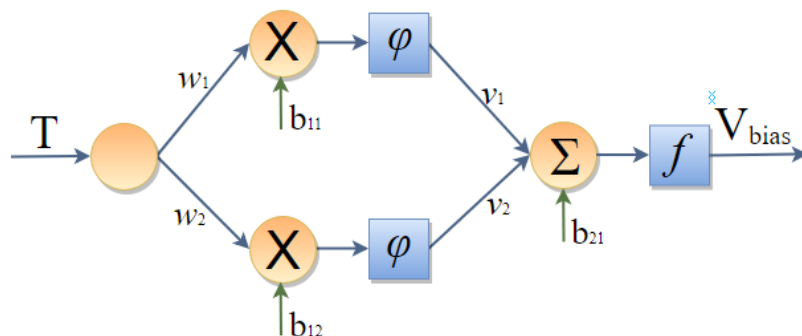


Рис. 2.7. ШНМ радіальних базисних функцій для компенсації температурних дрейфів ММГ

### ***2.3.3 Алгоритм поєднання калібрування вихідного сигналу та компенсації температурних дрейфів ММГ штучною нейронною мережею***

Недоліками розглянутих методів температурної компенсації є необхідність застосовувати окремі поліноми або ШНМ для температурної компенсації параметрів моделі вихідного сигналу ММГ. Для вирішення проблеми пропонується алгоритм з використанням однієї ШНМ поширення помилки, який дозволяє спростити процес обробки вихідного сигналу ММГ.

Перетворення вихідного сигналу ММГ (коди АЦП, напруга, струм) в кутову швидкість обертання (в  $^{\circ}/\text{с}$ ) з компенсацією похибок різного характеру можна розглядати як задачу апроксимації нелінійних багатовимірних залежностей. Типові методи апроксимації таких функцій вимагають побудови громіздких алгоритмів і значних обчислювальних ресурсів, проте ШНМ, як відомо, є універсальними апроксиматорами і досить просто представляють таку функцію.

Оцінимо необхідну кількість синаптичних зв'язків та нейронів в прихованому шарі для представлення такої функції. Входами нейромережі будуть сигнал з ММГ  $U_{\omega z}$  та температура його термодатчика  $U_{\omega z}$ , виходом – кутова швидкість  $\omega$  із скомпенсованими температурними похибками. Елементами навчальної вибірки будуть пари  $\{(U_{\omega zi}, T_i), \omega_i\}$ , кількість яких рівна:

$$N = k \cdot l \quad (2.62)$$

де:  $k, l$  – кількість заданих в процесі калібрування на обертальному стенді еталонних кутових швидкостей  $\omega_i$  та кількість температур калібрування  $T_i$ .

Так для діапазону кутових швидкостей  $\pm 300^{\circ}/\text{с}$  з кроком  $50^{\circ}/\text{с}$  ( $k = 13$ ) для трьох температурних точок калібрування ( $l = 3$ ) кількість початкових пар дорівнює  $N = 39$ . Тоді за формулою (2.37) необхідна кількість синаптичних зв'язків  $8 \leq L_w \leq 161$ , а необхідна кількість нейронів в прихованому шарі  $3 \leq L \leq 54$ .

Важливим аспектом нейромереж з декількома входами є нормалізація вхідних даних. Необхідність нормалізації вибірок даних зумовлена самою природою використовуваних в ШНМ моделей змінних. Будучи різними за фізичною природою, вони часто можуть сильно відрізнятися між собою за абсолютними величинами. Нормалізація даних дозволяє привести всі використовувані числові значення змінних до однакової області їх зміни, завдяки чому з'являється можливість звести їх разом в одній ШНМ моделі [35].

Застосуємо лінійну нормалізацію (min-max нормалізація), яка полягає в лінійному перетворенні множини значень з одного діапазону в інший  $x \in [\min(x), \max(x)] \Rightarrow \tau(x) \in [A, B]$ . Приведемо вихідний сигнал ММГ та сигнал його датчика температури до діапазону  $(-1, 1)$ :

$$\begin{aligned}\tilde{U}_{ik} &= 2 \cdot \frac{U_{ik} - U_{\min i}}{U_{\max i} - U_{\min i}} - 1 \\ \tilde{T}_{ik} &= 2 \cdot \frac{T_{ik} - T_{\min i}}{T_{\max i} - T_{\min i}} - 1\end{aligned}\tag{2.63}$$

де:  $U_{ik}, T_{ik}$  –  $i$ -те вхідне значення  $k$ -го прикладу вихідної вибірки в традиційних одиницях виміру.

Функції активації нейронів прихованого шару – функція гіперболічного тангенсу з областю значень в  $(-1, 1)$ :

$$f(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}\tag{2.64}$$

Графік такої функції зображено на рис. 2.8.

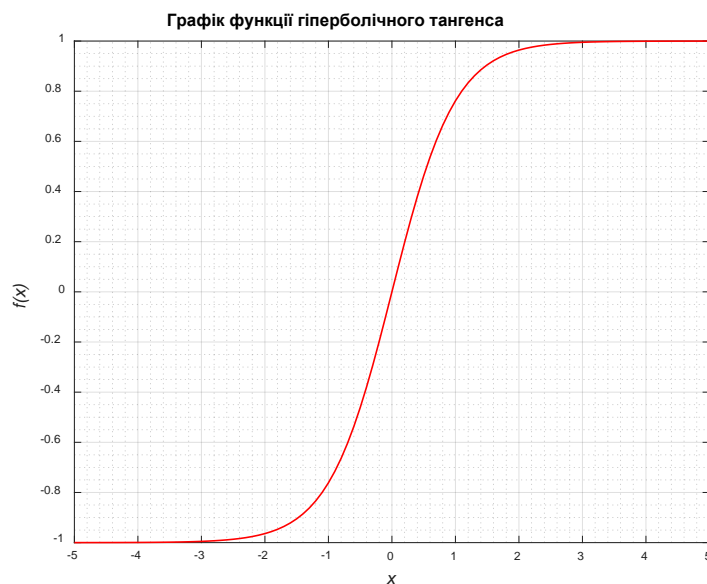


Рис. 2.8. Графік гіперболічної тангенціальної функції

Таким чином архітектура такої нейромережі зображена на рис. 2.9.

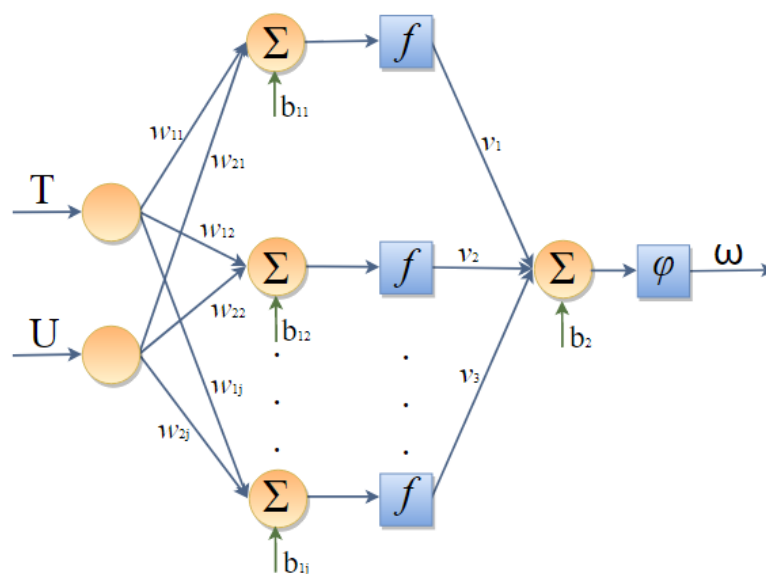


Рис. 2.9. Архітектура ШНМ ЗПП

Результати експериментальної перевірки розглянутих методів та алгоритмів наведена в розділі 3.

## Висновки до розділу 2

Розглянуто та проаналізовано традиційні методи алгоритмічної компенсації температурних похибок ММГ, які базуються на класичних методах апроксимації функції, та встановлено їх переваги і недоліки.

Розглянуто можливість застосування сучасних методів апроксимації, таких як штучні нейронні мережі для вирішення задачі температурної компенсації параметрів ММГ.

Використовуючи отримані знання було визначено моделі ШНМ для вирішення поставленої задачі двох типів: багатошарова мережа зворотного поширення помилки та двошарова мережа радіальних базисних функцій.

Проаналізувавши недоліки алгоритму з використанням таких моделей запропоновано вдосконалену модель ШНМ, яка поєднує процес перетворення вихідного сигналу ММГ та компенсацію температурних похибок.

## **РОЗДІЛ 3**

### **РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ПЕРЕВІРКИ МЕТОДІВ АЛГОРИТМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ДРЕЙФІВ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ГІРОСКОПІВ**

#### **3.1 Характеристики досліджуваного ММГ**

Для експериментальної перевірки алгоритмічної компенсації температурних дрейфів ММГ використовувався одновісний ДКШ компанії Systron Donner моделі LCG50-00500-100 (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Датчик кутової швидкості LCG50-00500-100

Основні характеристики ДКШ наведені в таблиці 3.1 [33].

Таблиця 3.1. Основні характеристики ДКШ LCG50-00500-100

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання	$\pm 500$ °/с.
g-чутливість	$< 0.05$ °/с/g
Нелінійність статичної характеристики	$< 0.05$ %
Температурний дрейф	$20$ °/с
Температурна чутливість масштабного коефіцієнта	$< 0.1$ %/°C
Щільність шуму (при 100 Гц)	$\leq 0.01$ °/с/ $\sqrt{\text{Гц}}$
Робоча температура	-40 °C до +85 °C

Для визначення основних випадкових похибок ДКШ - нестабільності зміщення нуля та випадкового блукання кута (випадкового дрейфу) побудована варіація Аллана, графік якої наведено на рис. 3.2.

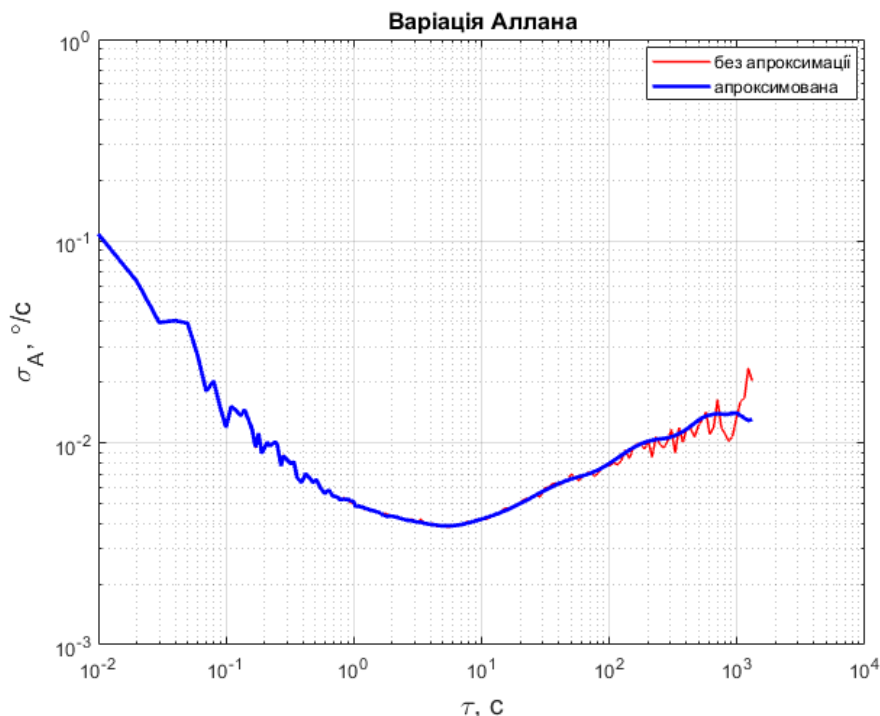


Рис. 3.2. Варіація Аллана для ДКШ LCG50-00500-100

Вихідний сигнал пуску для побудови варіації Аллана наведено на рис. 3.3.



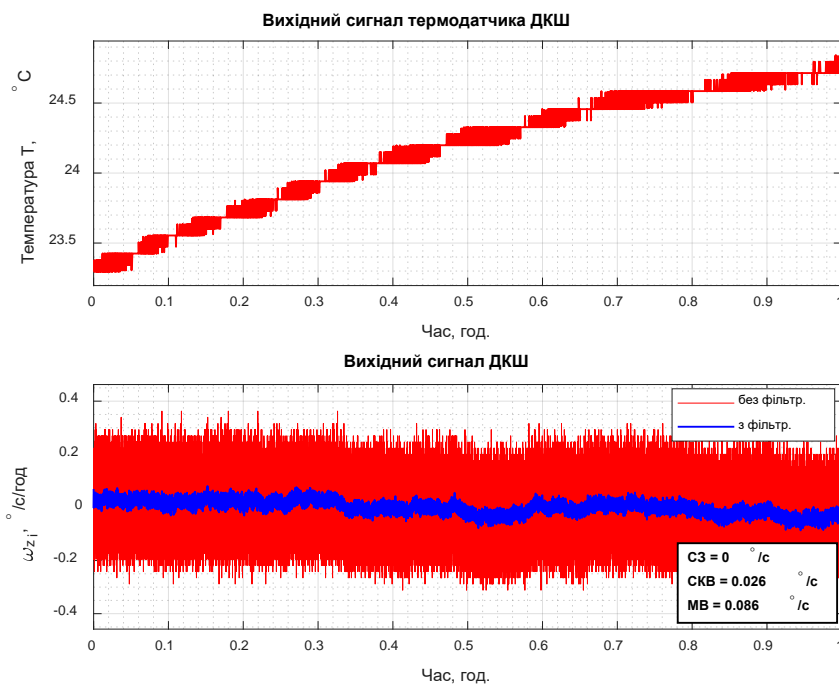


Рис. 3.3. Вихідний сигнал ДКШ та його термодатчика

З варіації Аллана (рис. 3.1) визначена нестабільність зміщення нуля (з діленням на 0.664) –  $B = 0.0059$  °/с, випадковий дрейф –  $N = 0.002$  °/с/√Гц.

### 3.2 Результати калібрування ДКШ

Для визначення залежності параметрів моделі вихідного сигналу ДКШ (2.2) від температури було проведено його калібрування в кліматичній камері. Процес калібрування проводився в два етапи: визначення масштабного коефіцієнту  $k_z$  на обертальному стенді та визначення зміщення нульового сигналу  $U_{z0}$  і його коефіцієнту чутливості до прискорень  $b_z$  на оптичній ділильній головці (ОДГ). Для точного визначення температурної залежності  $k_z$  та  $U_{0z}$  було обрано діапазон температури  $T = -20 \dots +50$  °С з кроком в 10 °С, крім того для зменшення впливу шуму вимірювань, вихідний сигнал ДКШ осереднювався протягом 30 с, тому  $n_{\omega z}$  в розрахунках параметрів не враховується.

Розглянемо процес калібрування.

На першому етапі збірку з 6 ДКШ LCG50-00500-100 було встановлено на обертальний стенд з вертикальною віссю обертання та базовою поверхнею, яку

поміщено в кліматичну камеру (рис. 3.4). Обертальний стенд має високу стабільність та точність задання кутової швидкості ( $0.1\text{ }^{\circ}/\text{с}$ ).

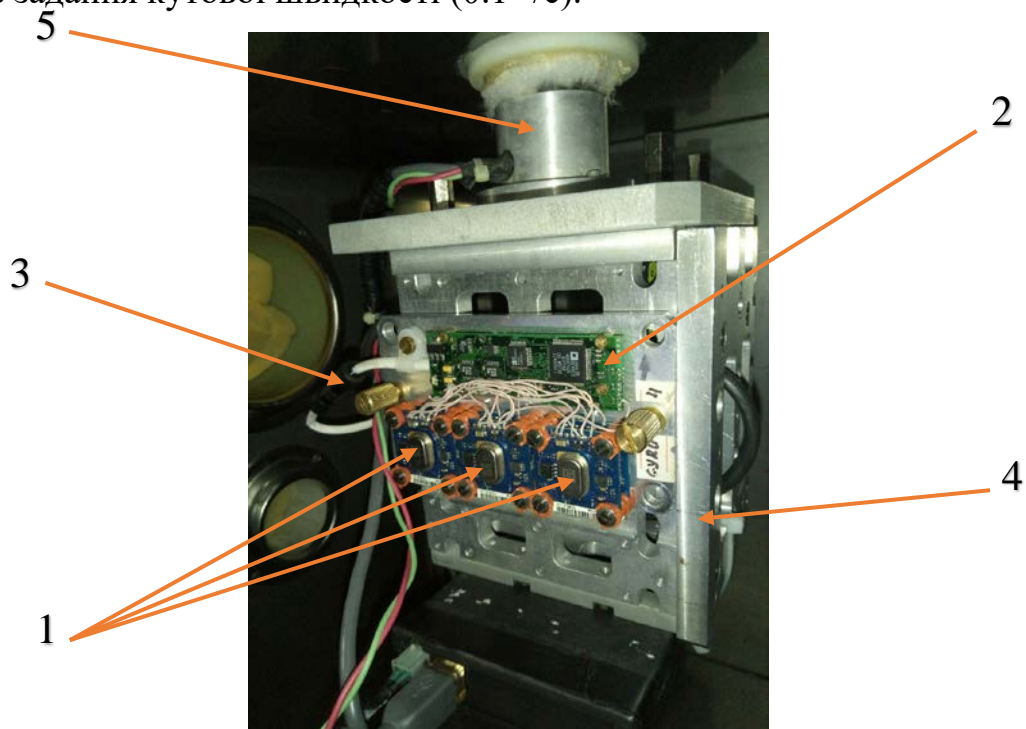


Рис. 3.4. Закріплення збірки ДКШ на обертальному стенді в кліматичній камері

На рис. 3.4. позначено:

1 – ДКШ, змонтовані на платах;

2 – плата з АЦП та мікроконтролером;

3 – роз'єм;

4 – кантувач для закріплення збірки ДКШ на базовій поверхні обертального стенду;

5 – вал обертання обертального стенда.

Для побудови точної статичної характеристики масштабного коефіцієнту калібрування проводилося в діапазоні кутових швидкостей  $\pm 300\text{ }^{\circ}/\text{с}$  з нерівномірно заданим кроком:  $\Omega = [300, 250, 200, 150, 100, 80, 60, 40, 0, -40, -60, -80, -100, -150, -200, -250, -300]\text{ }^{\circ}/\text{с}$ .

На другому етапі збірку ДКШ було встановлено на ОДГ, вісь обертання якої виставлена в горизонті з точністю до 5 кутових секунд. Для встановлення збірки

ДКШ, на валу ОДГ також закріплена базова поверхня, яку поміщено в кліматичну камеру (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Базова поверхня для точного встановлення збірки ДКШ на ОДГ

Враховуючи, що ДКШ LCG50-00500-100 має одну вісь чутливості достатньо 2 положень відносно вектора прискорення сили тяжіння  $\vec{g}$ , проте для точного визначення зміщення нуля було проведено калібрування в 4 положеннях (рис. 3.6).

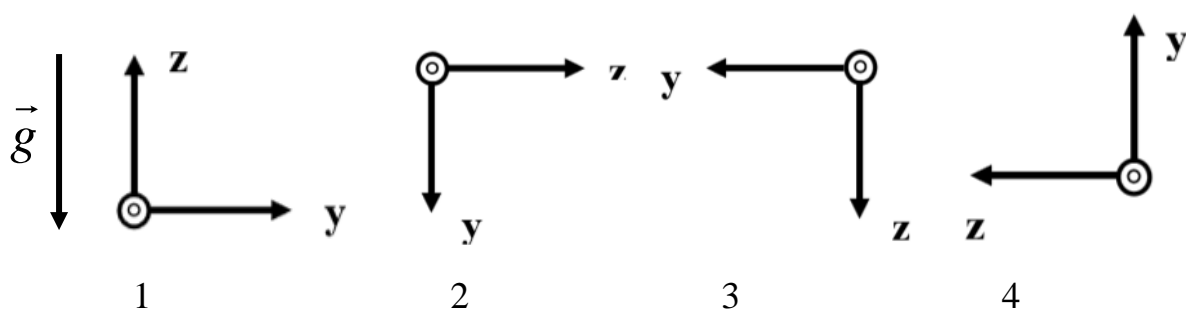


Рис. 3.6. Положення вісі чутливості ДКШ при калібруванні на ОДГ

Після закінчення процедури калібрування на всіх температурних точках розраховано відповідні параметри моделі (2.2). Масштабний коефіцієнт розрахований за МНК:

$$k_z = U_{\omega z} \cdot \Omega^T \cdot (\Omega \cdot \Omega^T)^{-1} \quad (3.1)$$

де:  $U_{\omega z}$  – вектор вихідних осереднених сигналів ДКШ з розмірністю  $1 \times 17$  в кодах АЦП;  $\Omega$  – вектор заданих значень кутової швидкості з розмірністю  $1 \times 17$  в  $^\circ/\text{с}$ .

Зміщення нуля та його коефіцієнт чутливості до прискорень розраховані за формулами:

$$U_{\omega z 0} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 U_{\omega z i}$$

$$b_z = \frac{(U_{\omega z 1} - U_{\omega z 3})}{2 \cdot g} - \frac{k_z \cdot u \cdot \sin \varphi}{g} \quad (3.2)$$

де:  $U_{\omega z 1}$ ,  $U_{\omega z 3}$  – осереднений вихідний сигнал ДКШ в положеннях відповідно до рис. 3.6.;  $g$  – прискорення сили тяжіння в місці проведення експерименту в  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $u$  – кутова швидкість обертання Землі в  $^\circ/\text{с}$ ;  $\varphi$  – географічна широта місця проведення експерименту, в градусах.

Розраховані параметри для номінальної температури ( $20^\circ\text{C}$ ) ДКШ наведені в таблиці 1.

Таблиця 3.2. Результати калібрування ДКШ

Тип ДКШ	№ ДКШ в збірці	Результати калібрування		
		$k_z$ , коди/ $^\circ/\text{с}$	$U_{\omega z 0}$ , коди	$b_z$ , коди/ $\text{м}/\text{с}^2$
LCG50-00500-100	5	-43,465	199,788	-0,099

Графік похибок вимірювання кутової швидкості ДКШ наведено на рис. 2.7.

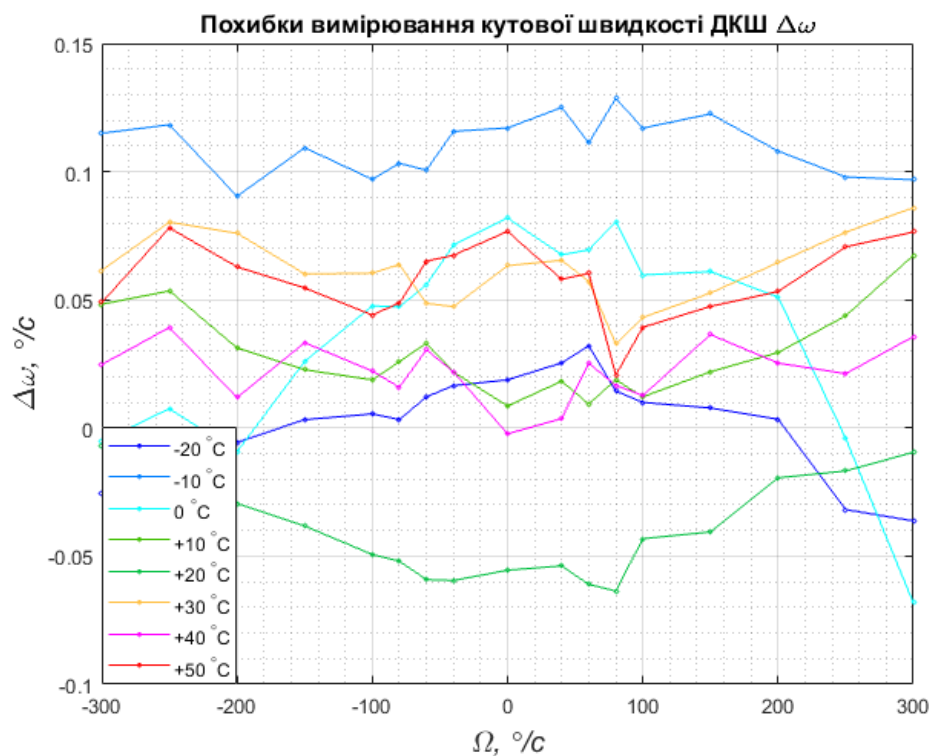


Рис. 3.7. Похибки вимірювання кутової швидкості ДКШ

Графіки залежності масштабного коефіцієнту та зміщення нуля від температури наведено на рис. 3.8.

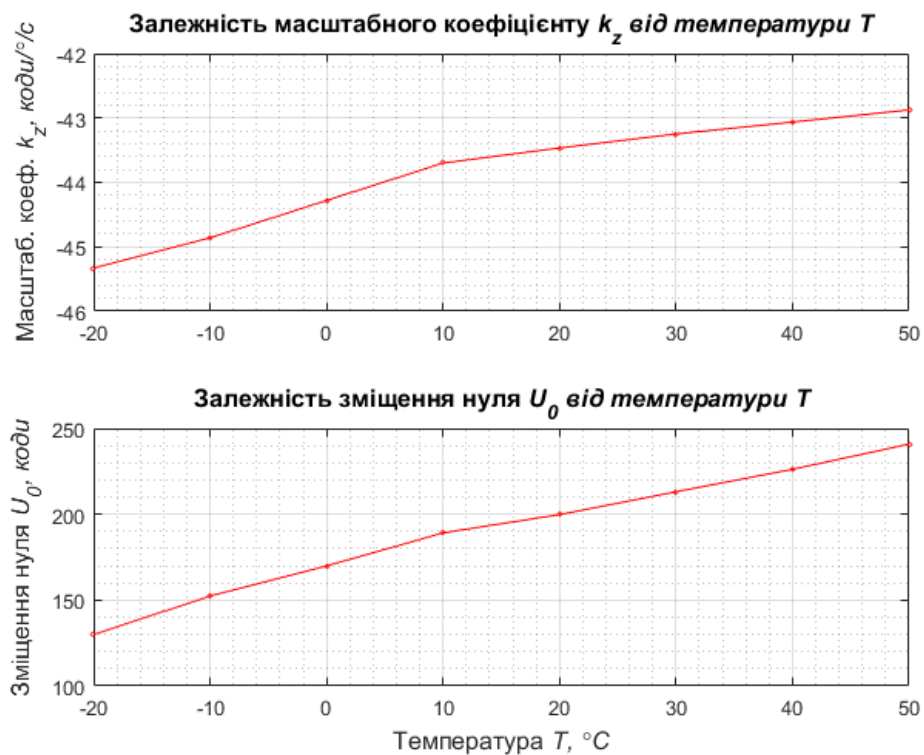


Рис. 3.8. Залежність коефіцієнтів  $U_{\omega z0}$  та  $k_z$  від температури  $T$

Аналізуючи графік залежності параметрів  $k_z$  та  $U_{\omega z0}$  від температури, можна зробити висновок про необхідність температурної компенсації цих параметрів.

### 3.3 Результати експериментальної перевірки методів алгоритмічної компенсації температурних дрейфів ДКШ

Для перевірки та порівняння методів алгоритмічної компенсації температурних дрейфів ДКШ був виконаний температурний прохід в кліматичній камері по заданому профілю в діапазоні температури  $-20...+50$  °C. Під час експерименту вимірювальна вісь гіроскопу була направлена вертикально вгору та залишалася нерухомою протягом всього часу запису вихідного сигналу. Вихідний некомпенсований сигнал ДКШ та його термодатчика наведено на рис. 3.9.

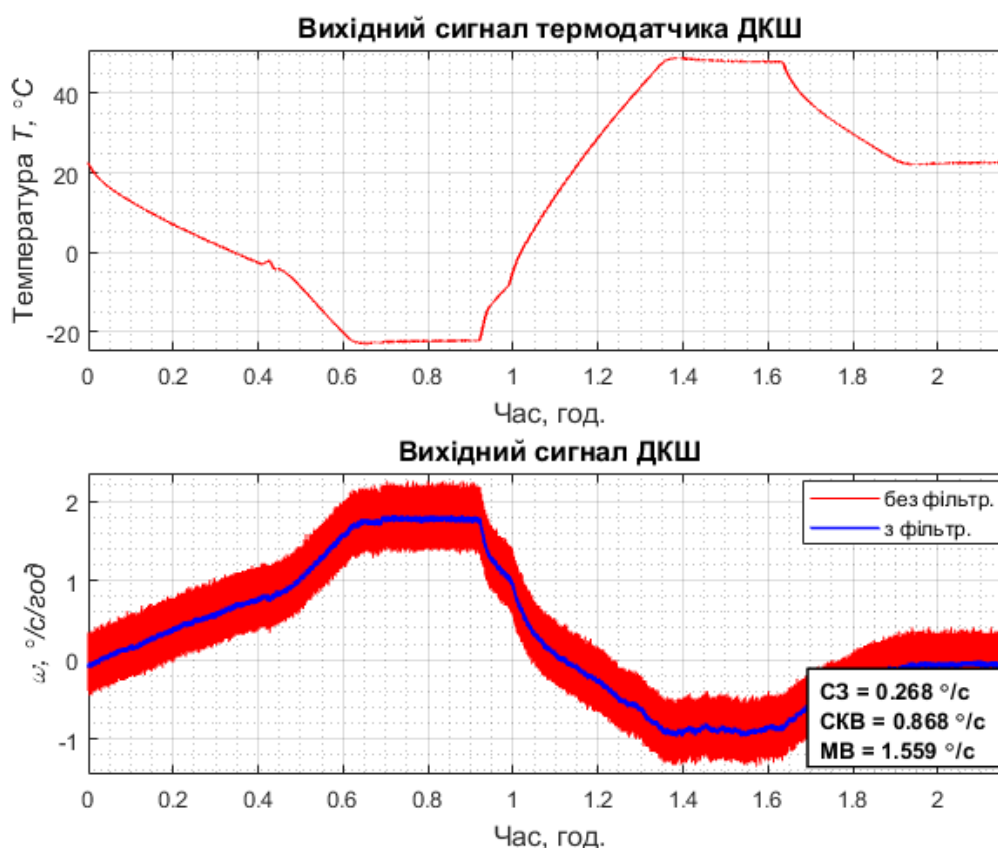


Рис. 3.9. Вихідний сигнал ДКШ та його термодатчика

Як бачимо з рис. 3.9. ДКШ має температурний гістерезис зміщення нуля. Більш наглядний вигляд температурного гістерезису наведено на рис. 3.10.

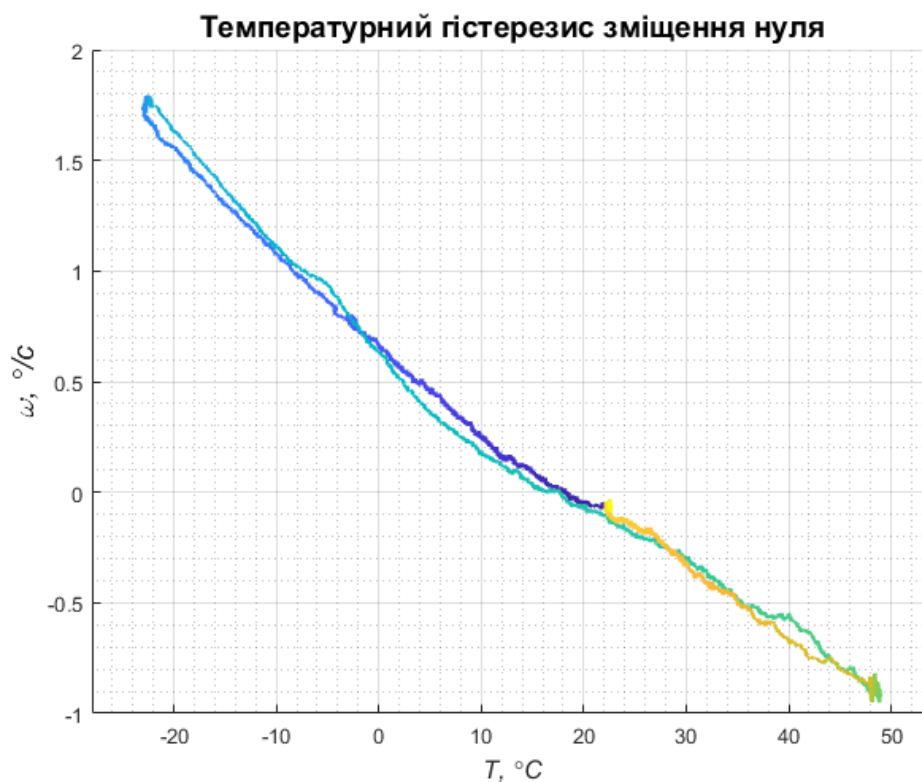


Рис. 3.10. Температурний гістерезис ДКШ

Також було проведено випробування для встановлення залежності дрейфу ДКШ від швидкості зміни температури (рис. 3.11).

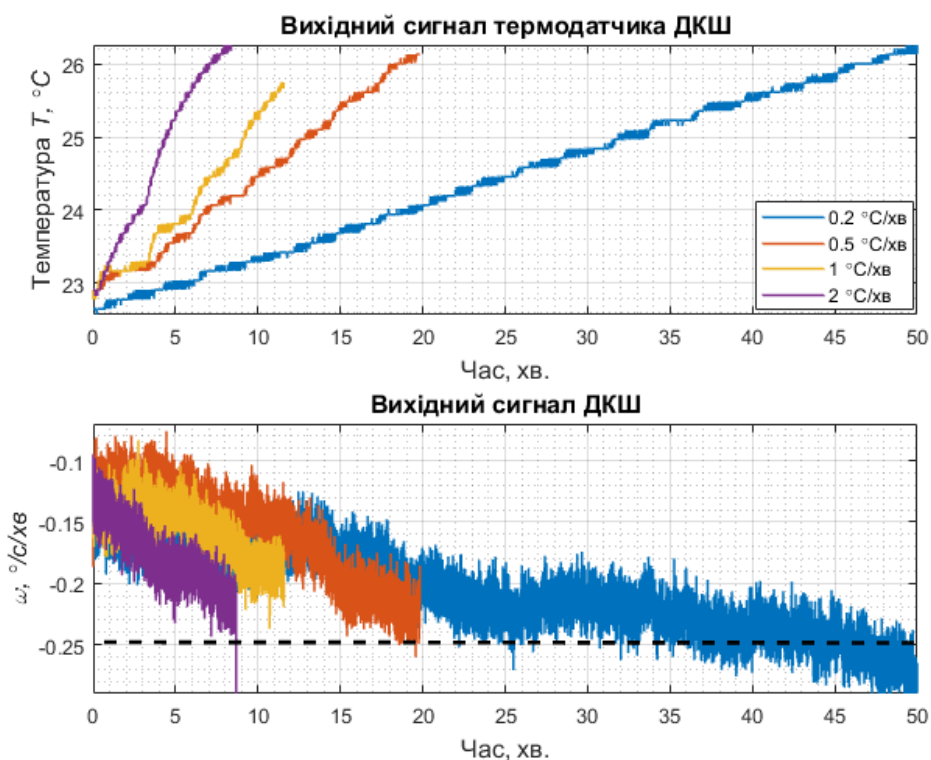


Рис. 3.11. Залежність дрейфу ДКШ від швидкості зміни температури

З отриманих результатів (рис. 3.10) та (рис. 3.11) видно, що ДКШ моделі LCG50-00500-100 має великий температурний дрейф, який залежність від температури, напрямку її зміни, та майже не залежить від швидкості зміни.

Застосуємо до вихідного сигналу ДКШ традиційні методи (локальної, глобальної інтерполяції, апроксимації МНК) компенсації температурних дрейфів та порівняємо їх.

Враховуючи, що на практиці температурне калібрування зазвичай проводиться для трьох значень температури – мінімальної  $T_{min}$ , номінальної  $T_{ном}$  та максимальної  $T_{max}$  для робочого діапазону ММГ, приймемо за опорні точки температури калібрування при  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  та  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для кусково-лінійної інтерполяції отримаємо два інтервали, для кожного з яких будується свій інтерполюючий поліном. Інтерполяційні поліноми для  $k_z$  та  $U_{\omega z 0}$  (2.7) розраховані за формулами (2.6):



$$\begin{cases} U_{\omega z0}(T_i) = 46,889 + 0,029 \cdot T_i & \text{при } T_i < T_{ном} \\ U_{\omega z0}(T_i) = 77,861 + 0,023 \cdot T & \text{при } T_i > T_{ном} \end{cases} \quad (3.3)$$

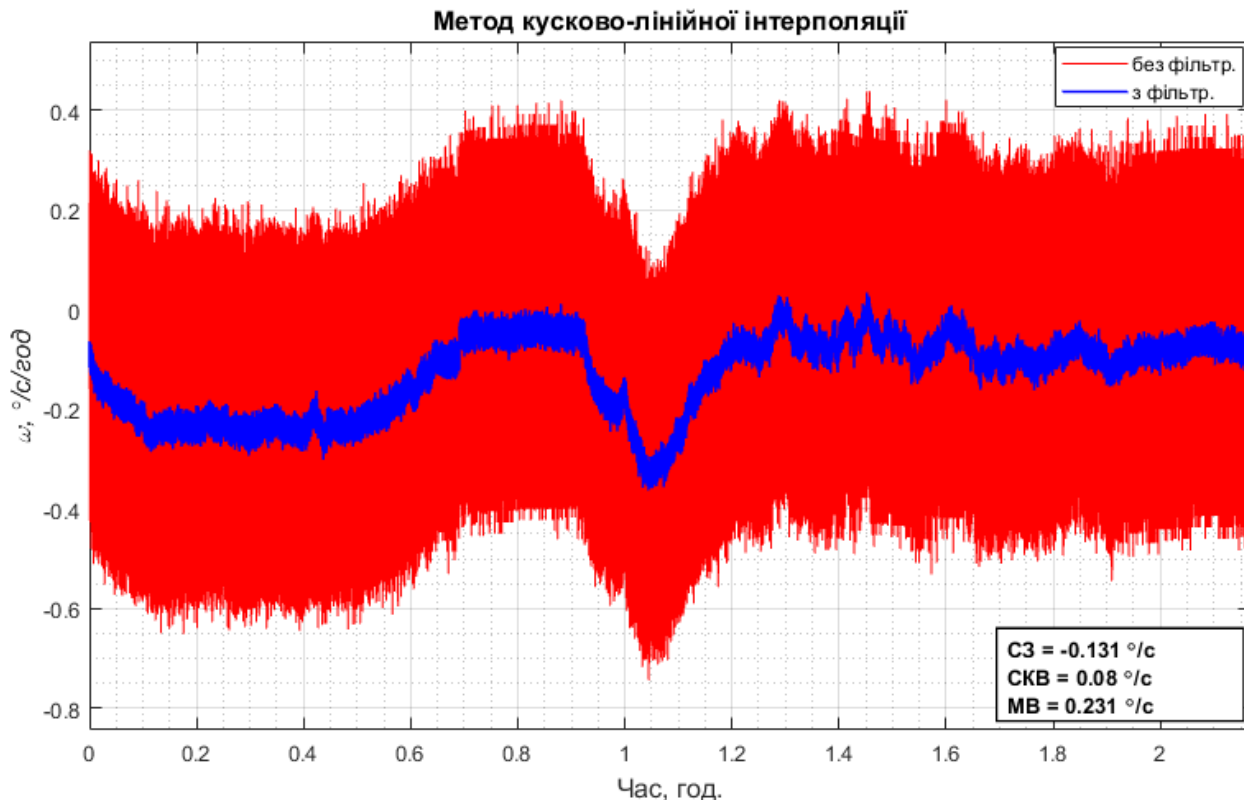
$$\begin{cases} k_z(T_i) = -47,541 + 7,638 \cdot 10^{-4} \cdot T_i & \text{при } T_i < T_{ном} \\ k_z(T_i) = -45,220 + 3,288 \cdot 10^{-4} \cdot T & \text{при } T_i > T_{ном} \end{cases}$$

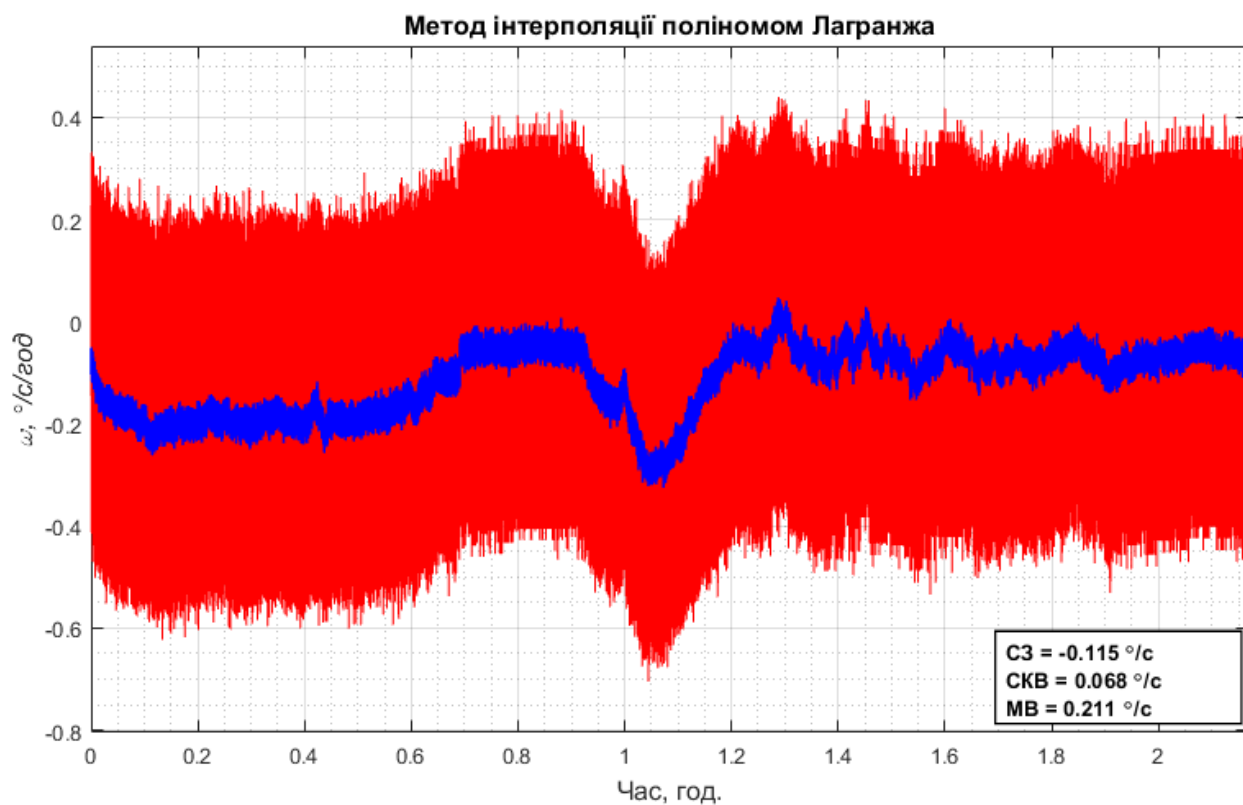
апроксимуючий поліном 2-го степеня розрахований за МНК (2.30) має коефіцієнти:

$$\begin{aligned} U_{\omega z0}(T_i) &= 25,728 + 0,039 \cdot T_i - 1,369 \cdot 10^{-6} \cdot T_i^2 \\ k_z(T_i) &= -49,128 + 0,002 \cdot T - 1,027 \cdot 10^{-7} \cdot T_i^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

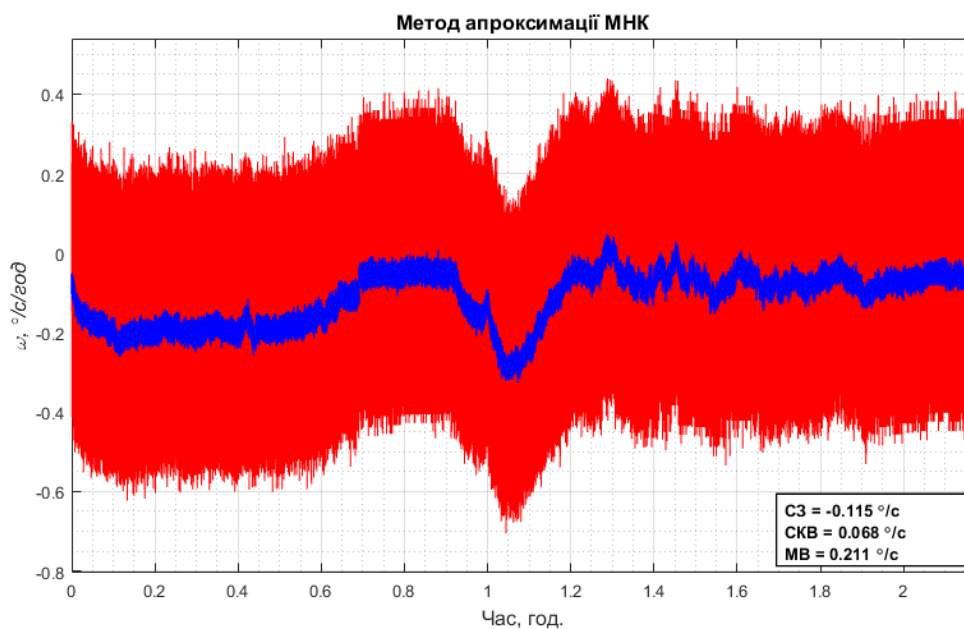
Для перевірки якості інтерполяції многочленом Лагранжа було застосовано дві схеми розрахунку базисних поліномів (див. розділ 2.2.2). Отримані результати компенсації ідентичні, що говорить про коректність обох методів, проте ітераційний метод Ейткена показав більшу швидкість обчислення, що є перевагою для реалізація в мікропроцесорній техніці.

Вихідний скомпенсований сигнал ДКШ вказаними методами зображено на рис. 3.12.





б)



в)

Рис. 3.12. Результаты компенсации температурных дрейфов ДКШ методом: а) кусково-линейной интерполяции; б) интерполяции многочленом Лагранжа; в) аппроксимации МНК

Апроксимація масштабного коефіцієнта та зміщення нуля показано на рис. 3.13.

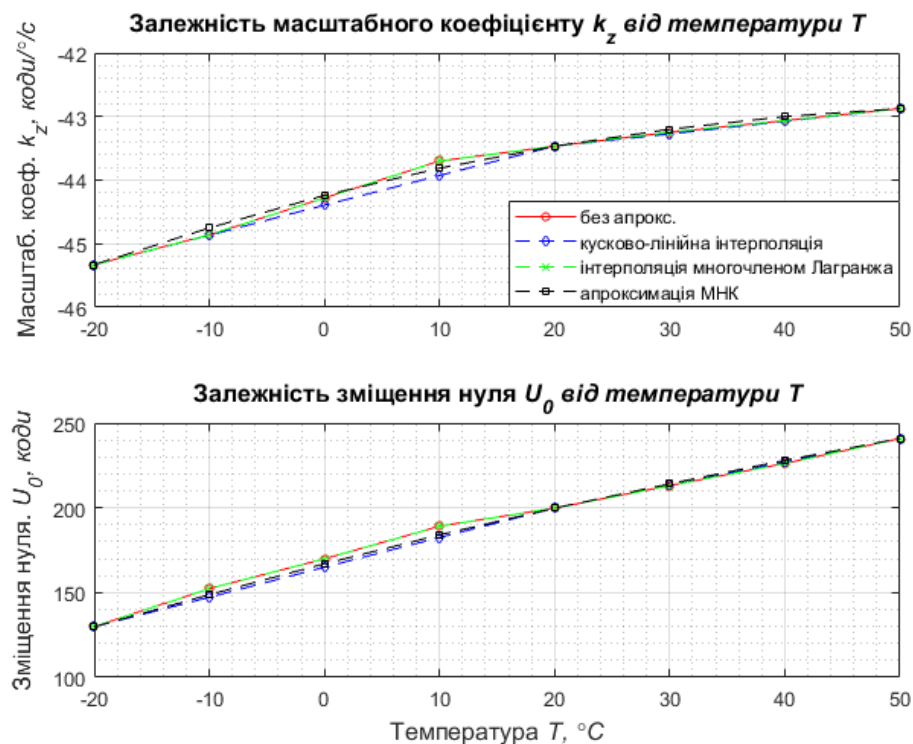


Рис. 3.13. Апроксимація  $k_z$  та  $U_{\omega z 0}$  різними методами

Для дослідження ефективності застосування алгоритмів ШНМ використовувалися функції Neural Network Toolbox програмного середовища MATLAB. Гіперпараметри (параметри навчання) ШНМ підбиралися експериментальним шляхом. Отримані результати наведено на рис. 3.13

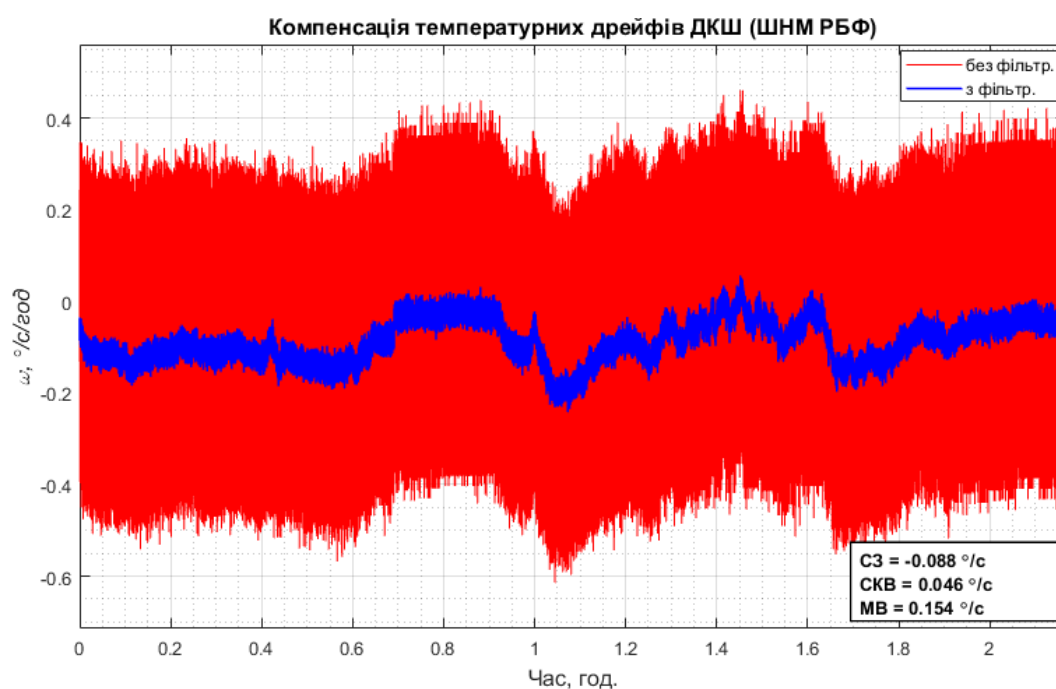
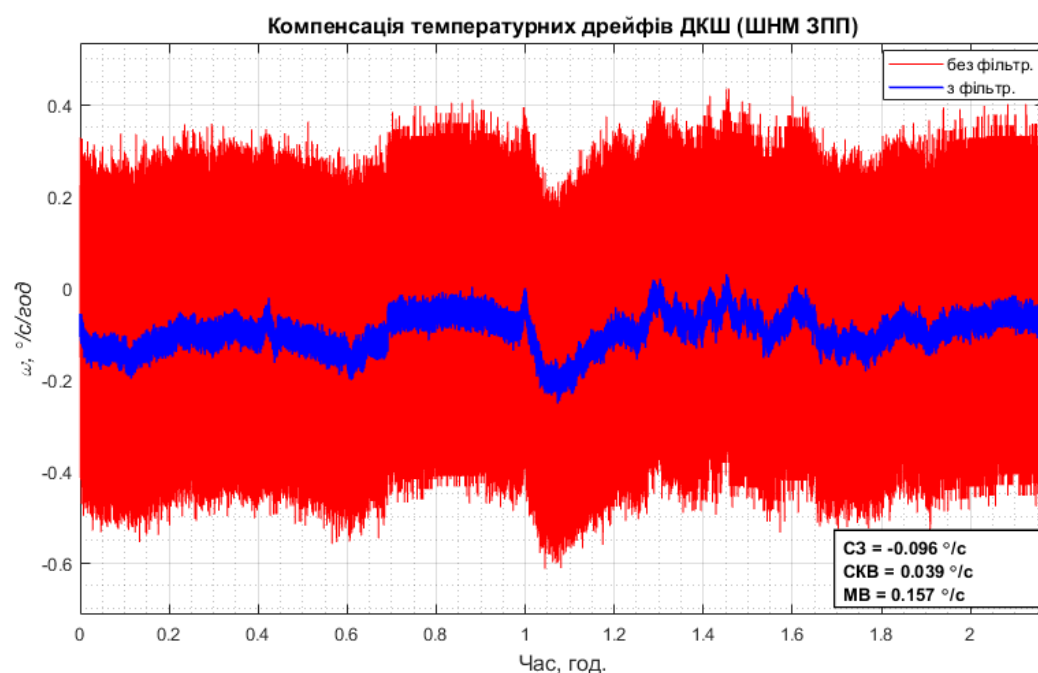
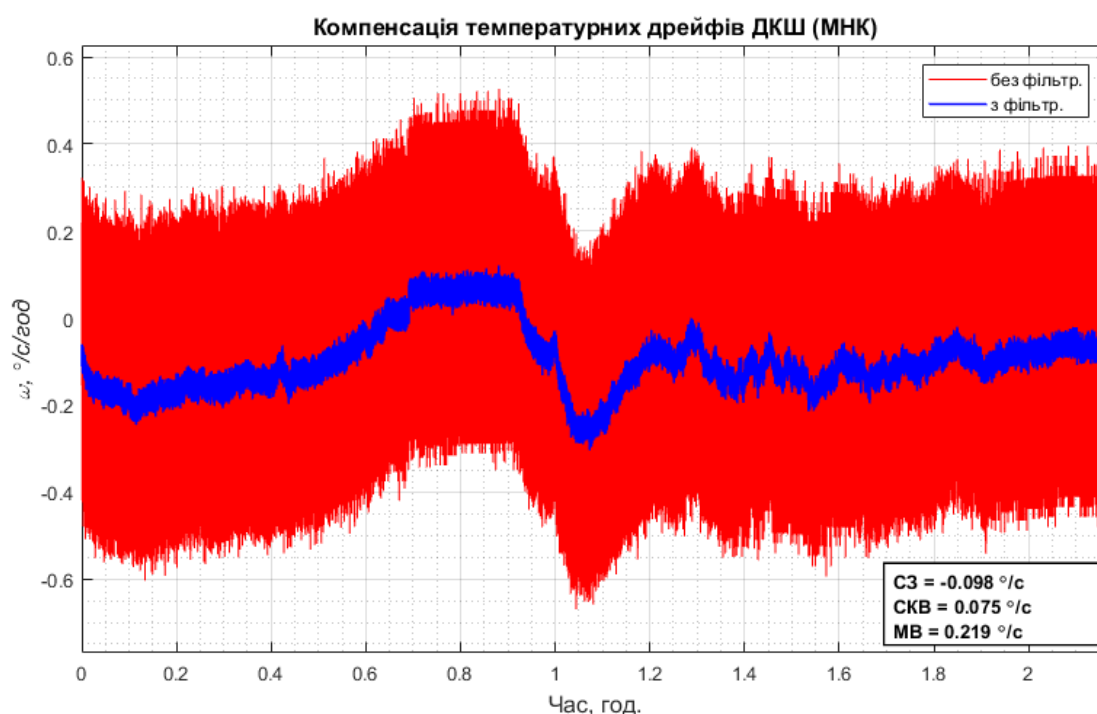


Рис. 3.13. Результати компенсації температурних дрейфів алгоритмами ШНМ: а) ШНМ зворотного поширення похибки; б) ШНМ радіальних базисних функцій

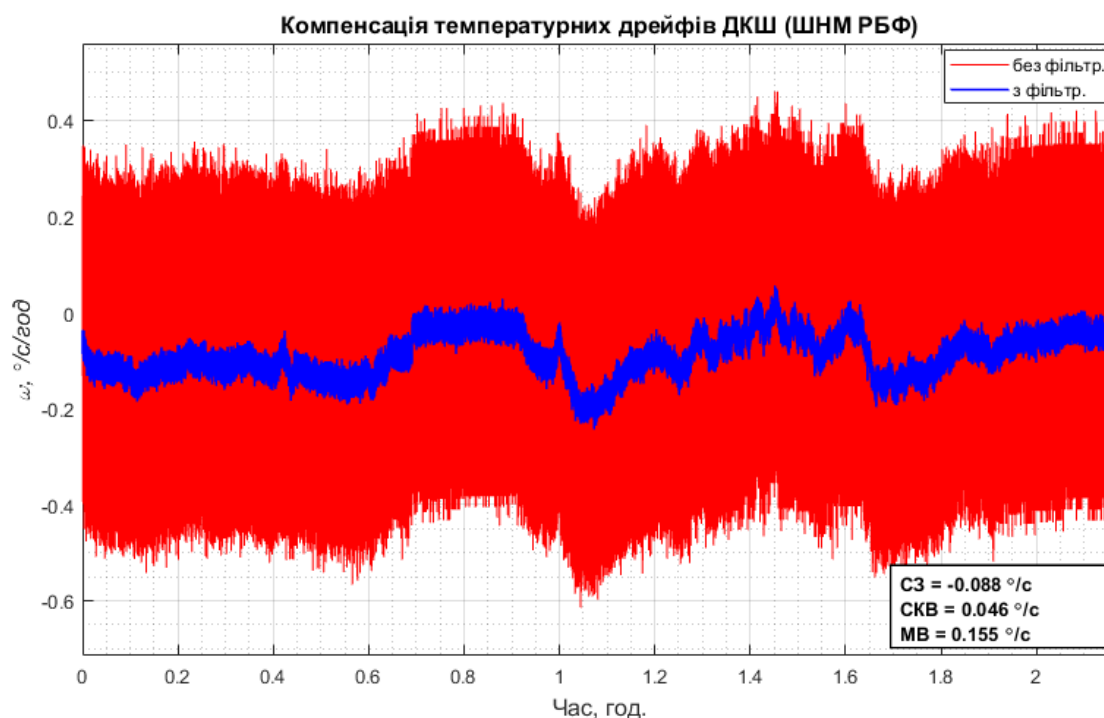
Порівнюючи результати компенсації температурного дрейфу різними методами, можна зробити висновок, що точність компенсації алгоритмами ШНМ вища, та має більш лінійний характер.

Варто зауважити, що при виборі кількості нейронів в прихованому шарі ШНМ ЗПП більше розрахованої за формулою (2.38) відбувається процес запам'ятовування, що призводить до похибок компенсації.

Порівняємо точність екстраполяції ШНМ зворотного поширення помилки та поліномом отриманим методом найменших квадратів. Для цього приймемо за опорні точки температури калібрування при  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  та  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , розрахуємо коефіцієнти поліномів МНК та повторимо процес навчання ШНМ, після чого застосуємо їх для компенсації температурних дрейфів в діапазоні  $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Результати моделювання наведено на рис. 3.14.



а)



б)

Рис. 3.14. Результати компенсації температурних дрейфів ДКШ при виході за температурний діапазон калібрування: а) МНК; б) ШНМ зворотного поширення помилки

З рис. 3.14 видно, що обидва методи з хорошою точністю компенсують температурний дрейф ДКШ при виході за температурний діапазон калібрування.

Для перевірки запропонованого в розділі 2.3.3 алгоритму множина навчальних пар була розділена у співвідношенні 70/30, де 70% – для навчання ШНМ, 30% – для тестування, тобто перевірки коректності перетворення вихідного сигналу ДКШ (в кодах АЦП) в кутову швидкість (в  $^{\circ}/\text{с}$ ). Кількість нейронів в прихованому шарі, при яких ШНМ коректно перетворює вхідне значення сигналу ДКШ та компенсує температурний дрейф з достатньою точністю підбиралась експериментальним шляхом, оцінюючи середньоквадратичне відхилення похибки вимірювання кутової швидкості  $\Delta\omega_z$  для пар, які не входили в навчальну множину (рис. 3.15).

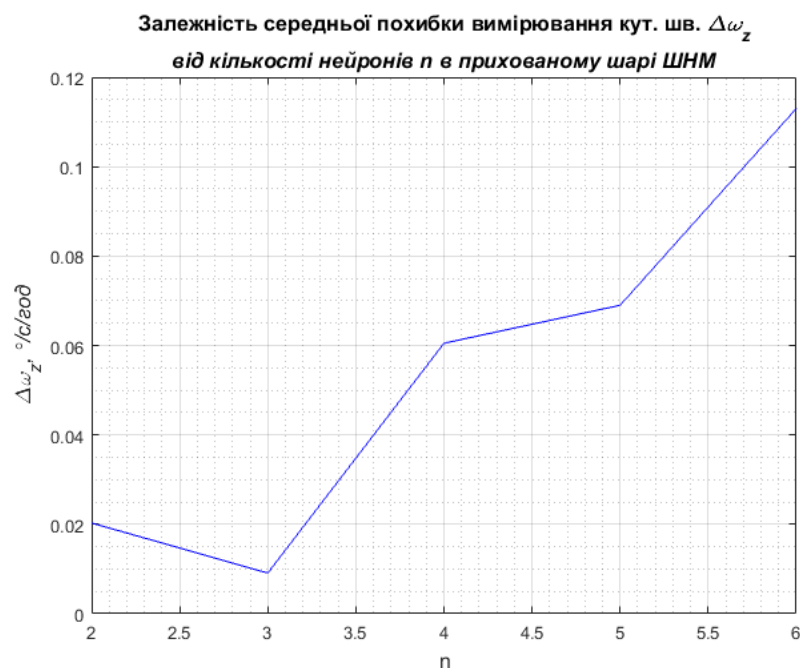


Рис. 3.15. Залежність середньоквадратичного відхилення похибки вимірювання кутової швидкості ДКШ від кількості нейронів в прихованому шарі

Таким чином було встановлено, що найкраща точність досягається при трьох нейронах в прихованому шарі. Графік перевірки коректності перетворення вихідного сигналу ДКШ штучною нейронною мережею в задану кутову швидкість, яка не входила в навчальну вибірку зображено на рис. 3.16

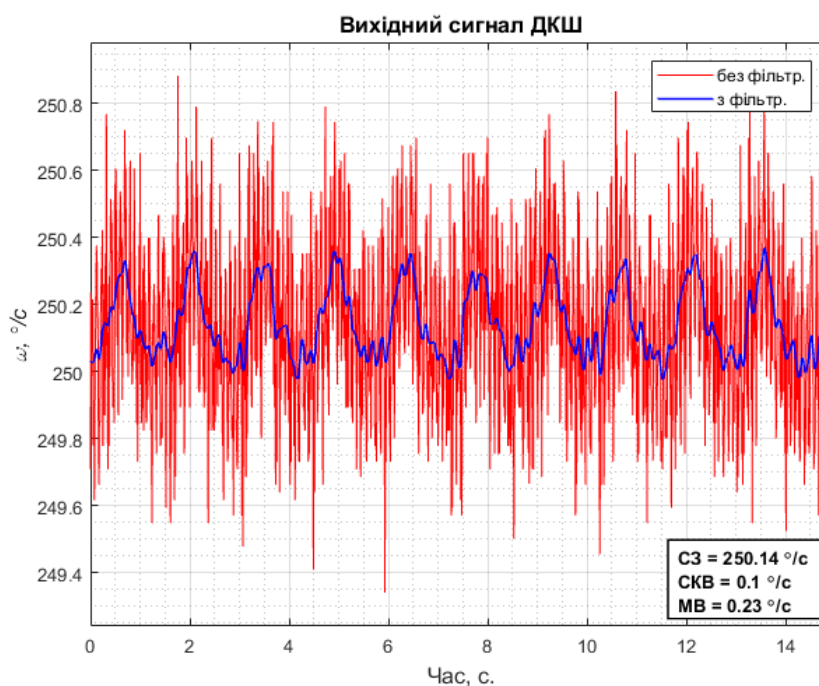


Рис. 3.16. Вихідний сигнал ДКШ

Порівняємо точність вимірювання кутової швидкості запропонованим методом та традиційним методом з компенсацією температурних похибок поліномом 2-го степеня. Графік похибок вимірювання кутової швидкості наведено на рис. 3. 17.

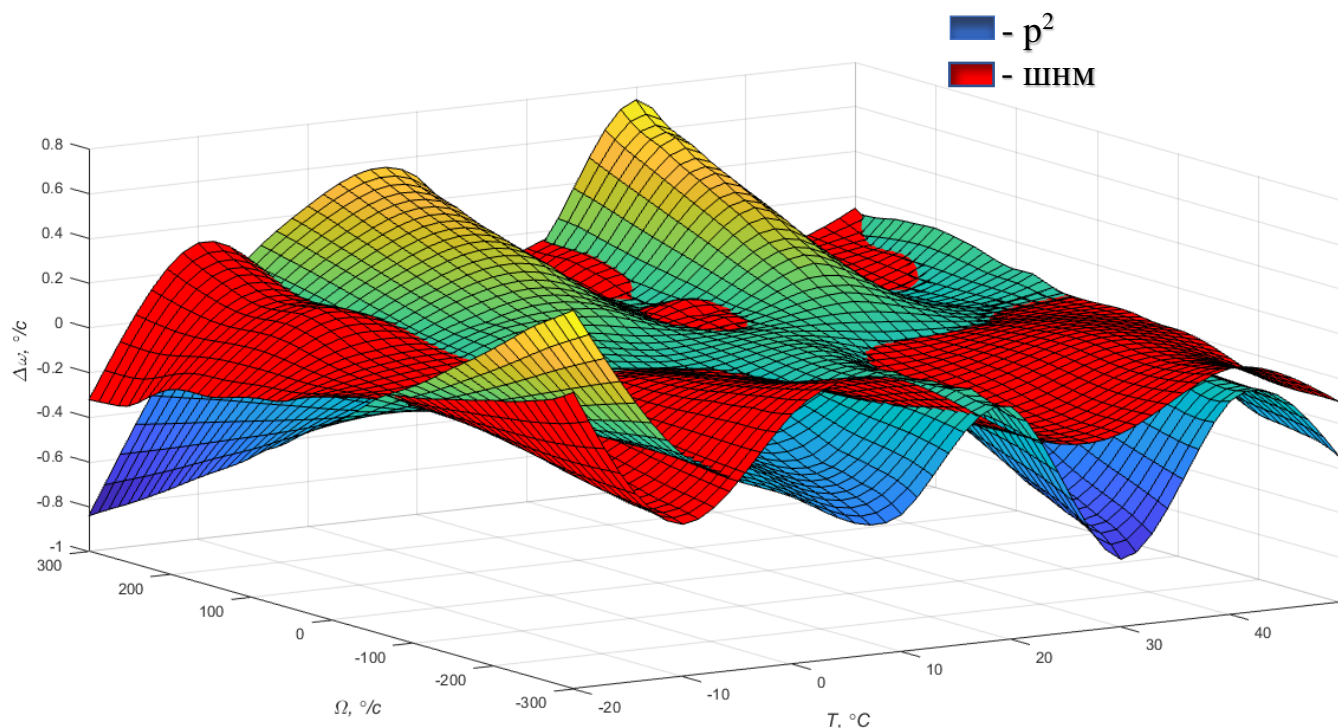


Рис. 3.17. Графік похибок вимірювання кутової швидкості

З рис. 3.17 видно, що запропонований алгоритм коректно відпрацьовує для всього діапазону вимірювання ДКШ та більш точно компенсує температурні похибки.

Графік скомпенсованого температурного дрейфу нульового сигналу ДКШ такою нейронною мережею зображено на рис. 3.18.



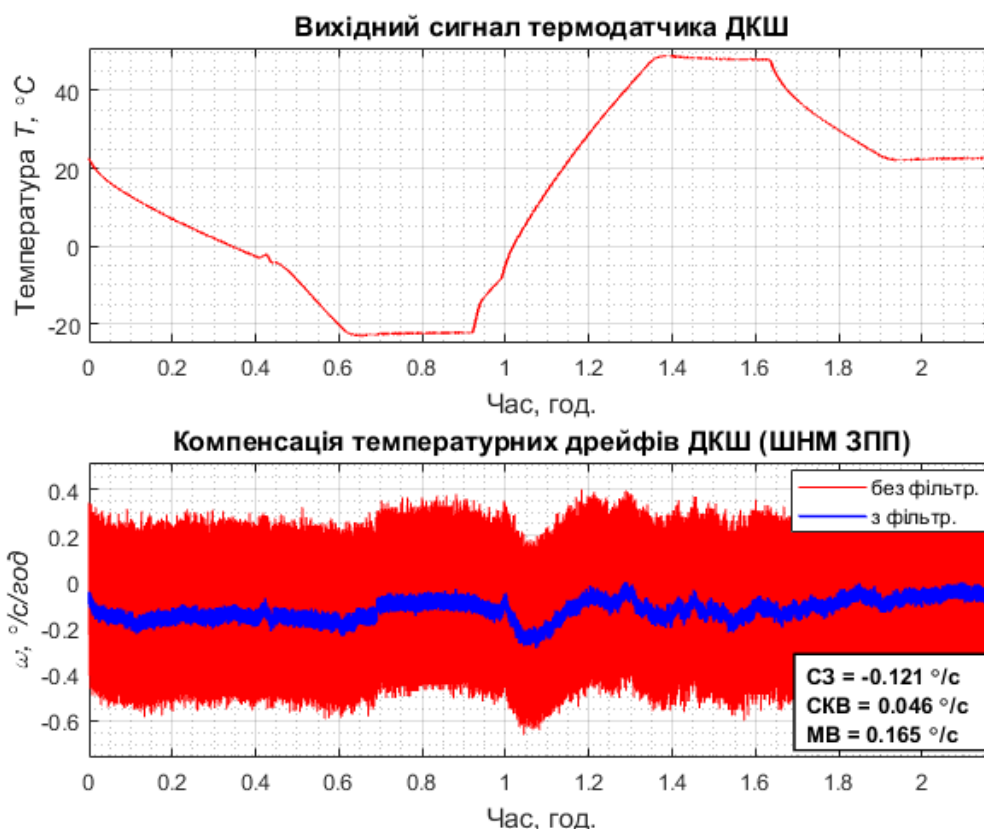


Рис. 3.18. Результат компенсації температурних дрейфів ДКШ запропонованим методом

Результати перевірки перетворення вихідного сигналу ДКШ з компенсацією температурних похибок показали коректність та ефективність запропонованого алгоритму.

Кількісне порівняння досліджуваних методів наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Значення СКВ та амплітуди дрейфу до та після компенсації

Алгоритм компенсації	СКВ, %/c/год.	Амплітуда, %/c/год.
Без компенсації	0.868	1.559
Кусково-лінійна інтерполяція	0.080	0.231
Інтерполяція многочленом Лагранжа	0.068	0.211
Апроксимація МНК	0.068	0.211
ШНМ ЗПП	0.039	0.157
ШНМ РБФ	0.046	0.154
Комплексний з застосуванням ШНМ ЗПП	0.046	0.165

### Висновки до розділу 3

Результати температурного калібрування та проведених температурних випробувань обраного датчика кутової швидкості показали необхідність компенсації температурних похибок, які в більшій мірі залежать від зміни та напрямку зміни температури, та майже не залежать від швидкості її зміни.

Для перевірки методів компенсації температурних дрейфів було проведено моделювання в програмному середовищі MATLAB з використанням реальних вихідних сигналів ДКШ. Результати показали високу ефективність методів апроксимації МНК та з використанням алгоритмів ШНМ, при цьому методи інтерполяції мають обмежене практичне застосування, що пов'язано з нездатністю працювати при виході за температурний діапазон калібрування.

Порівнюючи методи компенсації засобами апроксимації, можна зробити висновок про вищу ефективність методів з використанням ШНМ ніж традиційними, таким чином поставлена задача підвищення точності ММГ була досягнута.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ «АЛГОРИТМИ КОМПЕНСАЦІЇ ДРЕЙФІВ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ГІРОСКОПІВ»

#### 4.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

4.1.1 Зміст ідеї полягає у розробці та впровадженні алгоритмів компенсації дрейфів ММГ для покращення точності роботи ІВМ. Проаналізовано можливі напрямки застосування, а також основні вигоди, що може отримати потенційний користувач товару за різними напрямками застосування (табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Алгоритми компенсації дрейфів мікромеханічних гіроскопів	Військова промисловість	Покращення стабілізації обладнання, яке встановлюється на військову техніку
	Авіація	Покращення стабілізації обладнання на борту авіаційної техніки
	Морська справа	Внаслідок хвиль, морський транспорт піддається хитавиці, в наслідок чого обладнання, встановлене на ньому, потребує точної стабілізації
	Автомобільна промисловість	Покращення систем навігації і динамічного контролю безпеки
	Навігаційне обладнання	Покращення навігаційних систем для стабілізації супутникових антен, керування безпілотними літальними апаратами
	Робототехніка	Покращення систем навігації для мобільних роботів

	Медицина	Покращення стабілізації мікроінструментів, діагностичної апаратури
	Побутова електроніка	Покращення стабілізації зображень у фото- та відеокамерах, пристроях для віртуальних комп'ютерних ігор тощо.

Висновки: Як видно з таблиці 4.1, існує досить багато сфер, де актуальне використання запропонованої ідеї. Потенційних споживачів можна знайти у цивільних сферах, таких як авіація, морська справа, побутова електроніка, робототехніка, медицина, автомобільна промисловість та інших сферах, де використовується навігаційне обладнання, а також у військовій сфері. З таблиці також видно, що для потенційних користувачів існує багато вигод.

4.1.2 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї, основні відмінності від аналогів, які вже існують, а також товарів-замінників (табл. 4.2). Порівняння із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначення попередніх конкурентів;
- порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що

мають:

а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні).

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні Характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів	W (слабка сторона)	N (нейтра- льна сторона)	S (сильна сторона)
-------	--	---	--------------------------	-----------------------------------	--------------------------

		Мій проект	Всі виробники ММГ			
1	Вартість програмного забезпечення	500 ум.од.	2500 - 4000 ум.од.			Найменша оптимальна вартість
2	Маса	0 кГ	0.01 - 4 кГ			Маса приладу залишається незмінною, оскільки розробка є додатком до програмного забезпечення
3	Гарантійний термін	До 4 років без калібрування	До 2 років без калібрування			Найвищий
4	Швидкодія	0.1 с	0.5-1 с			Найкраща
4	Точність показників (наявність похибок)	Найвища/похибки відсутні	Висока/зведені до мінімуму			Найкращі показники та найвища точність

Висновки: Було визначено, що потенційними конкурентами проекту можуть виступати всі виробники ММГ. Проведено порівняння основних техніко-економічних характеристик. При цьому, як видно з таблиці 4.2, проект має виключні переваги з усіх показників, оскільки і був створений з метою покращення будь-якого приладу, який створюють конкуренти. Тобто, можна зробити також висновок, що всі потенційні конкуренти одночасно виступають і потенційними клієнтами, що спрощує вихід продукту на ринок.

## 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Проведено аудит технології за допомогою якою можна реалізувати ідею проекту (табл. 4.3). Це передбачає аналіз наступних складових:

- Технологію за якою буде виготовлено товар;
- Існування таких технологій;
- Доступність цих технологій.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Отримання патенту	Офіційні права на розробку ідеї, підтвердження авторства	Наявна	Доступна
2	Підвищення точності системи	Вдосконалення алгоритму роботи системи	Потрібно вдосконалити наявну розробку	Доступна
3	Спрощення реалізації алгоритмів на практиці	Вдосконалення програмного коду, розробка спеціальних інструкцій	Розробити	Доступна
4	Підвищити точність обробки вхідних даних	Оптимізація швидкості навчання нейромережі	Розробити	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Підвищення точність компенсації температурних дрейфів ММГ				

Висновки: За таблицею 4.3 обрано наступну технологію реалізації проекту – підвищення точності системи, це є найбільш привабливим для користувачів, тому що систему легко буде підлаштовувати під різноманітні вхідні параметри і використовувати для різноманітного обладнання. Цю технологію потрібно розробити, що підвищує унікальність. Всі описані технології реалізації є доступними.

### 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

4.3.1 Визначено ринкові можливості, які можна використати під час впровадження проекту (табл. 4.4), ринкові загрози, які можуть негативно вплинути на реалізацію проекту. Це дозволяє правильно спланувати напрямки розвитку проекту з урахуванням стану ринкового середовища.

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	7
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	5000000 ум.од.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Якщо розглядати військову, авіа- та суднобудовну сферу, медицину, то це сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують (якщо розглядати військову, авіа- та суднобудовну сферу, медицину)
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	48%

Висновки: Ринок є дуже привабливим для входження в зв'язку з гарною рентабельністю і загальним обсягом продаж. Існують певні обмеження, які стосуються просування товару на ринок військової та медичної, де потрібно виконання специфічних умов на стандартизації та сертифікацію. Кількість основних гравців на ринку дорівнює 7, що є досить оптимальною конкуренцією.

4.3.2 Визначено потенційні групи клієнтів, їх основні характеристики, на основі цього формується основний список вимог до товару (табл. 4.5).

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
-------	--------------------------	--	---	-----------------------------

1	Підвищення точності показників приладів (компенсація дрейфів ММГ)	Військові, розробка авіаційної і морської техніки, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніка, медицина	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Для військової та медичної сфери особливості пов'язані з стандартизацією і сертифікацією.</li> <li>- Для авіаційної і морської техніки важливішою є точність.</li> <li>- Для автомобільної промисловості, розробки навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніки, важливішим є простота впровадження</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Точність показників</li> <li>- Швидкодія алгоритму</li> <li>- Надійність</li> <li>- Адаптивність</li> <li>- Простота та легкість у використанні.</li> </ul>
---	---	--	---	--

Висновки: Визначено основні цільові аудиторії (військові, розробка авіаційної і морської техніки, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніка, медицина) та їх головні особливості, а також відмінності між вимогами до точності показників системи у різних груп аудиторії. Також визначено основні вимоги споживачів до товару, які полягають у точності компенсації, швидкодії алгоритму, надійності, адаптивності, простоті та легкості у використанні.

4.3.3 Аналіз ринкового середовища. Складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. № 4.6-4.7). Фактори в таблиці подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Зріст конкуренції	Вихід на ринок нових конкурентів, які будуть пропонувати більш дешевий або більш точний аналог за такою ж вартістю	Втрата клієнтів



2	Зменшення попиту	Оскільки товар не орієнтований на широкий загал, він може швидко перенасити ринок	Пошук нових клієнтів або можливостей адаптації алгоритмів під інші сфери
3	Вартість процедури впровадження алгоритмів до програмного забезпечення приладів	Подорожчання процедури впровадження алгоритмів до програмного забезпечення приладів, що призведе до подорожчання самого приладу	Відмова від товару внаслідок подорожчання
4	Зміни у сертифікації	Змінення стандартів сертифікації	Втрата клієнтів, для яких потрібен сертифікований товар
5	Точність	Погана точність продукту, товар не надійний	Відмова від товару

Висновки: У таблиці 4.6 описані основні види загроз, з яких головною загрозою обрано зріст конкуренції, що може призвести до відмови клієнтів від товару внаслідок появи більш дешевих або більш точних аналогів, які зможуть запропонувати потенційному користувачу кращі або близькі характеристики. Інші загрози також є дуже важливими і потрібно їх враховувати, оскільки наслідками може бути знову ж таки відмова користувачів від товару.

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту	Можуть з'явитись нові потенційні покупці, або компанії-конкуренти вийдуть з ринку	Зростання прибутку, можливість подальшого розвитку та вдосконалення
2	Необхідність модифікацій та вдосконалення	Розширення можливостей системи за потребою користувачів	Вдосконалення та розширення можливостей системи за бажанням потенційних або постійних клієнтів
3	Розробка нових допоміжних алгоритмів в якості додатків	Розширення можливостей системи	Розширення можливостей системи, збільшення появи нових клієнтів, можливість освоювати нові галузі
4	Нові потенційні групи клієнтів	Поява нових потенційних груп покупців	Аналіз потреб нової групи покупців
4	Здешевлення вартості процедури впровадження	Вдосконалення та спрощення процедури,	Зменшення ціни на готову систему

	алгоритмів до програмного забезпечення приладів	що призведе до її здешевлення	
--	---	-------------------------------	--

Висновки: У таблиці 4.7 описані основні види можливостей, з яких найголовнішими обрано збільшення попиту, що призведе до зростання прибутку, можливості подальшого розвитку та вдосконалення, і, як наслідок цього, можливі будуть будь-які інші можливості, що описані у таблиці. Інші фактори відкривають потенціал для вдосконалення та розширення можливостей алгоритму, а також до зменшення ціни на вже готову систему.

4.3.4 Аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.8).

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції - чиста	Практично відсутня конкуренція у галузі	- Можливість швидко проводити вдосконалення, випереджаючи конкурентів - Можливість прогнозування змін на ринку
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний	Потенційні клієнти є у всьому світі	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Товар може використовуватись у різноманітних галузях	Аналіз зміни потреб для кожної потенційної групи клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція товарів одного виду.	- Задоволення потреб клієнтів - Відповідність ринку
4. За характером конкурентних переваг - цінова	Варіювання ціни внаслідок вибору користувачем функціональних особливостей	Вдосконалення та спрощення процедури, що призведе до її здешевлення

Висновки: Проаналізовано основні риси конкуренції на ринку, їх вплив на діяльність підприємства, а також можливі дії компанії, щоб бути завжди конкурентоспроможною. Визначено, що конкуренція у галузі є невеликою (практично відсутньою), і вона існує між товарами одного виду, є можливості виходу

на міжнародний ринок, використання товару можливе у різноманітних сферах, а довіра до товару будується на репутації бренду.

4.3.5 Після проведення аналізу конкуренції проводиться аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю М. Портера) (табл. 4.9).

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальник и	Клієнти	Товари- замінники
Складові аналізу	Відсутні	Поки що відсутні	Всі виробники ММГ	Військові, розробка авіаційної і морської техніки, автомобільна промисловіст ь, розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніка , медицина	Всі наявні на ринку гіроскопи
Висновки:	Конкуренція у галузі поки що практично відсутня	Можливості виходу на ринок є, і вони не важкі. Можуть з'явитись потенційні конкуренти	Постачальник и не диктують умови ринку	Клієнти практично не диктують умов, окрім військової промисловост і та медицини, де існує обов'язкова сертифікація	Обмежень немає, тому що товар- замінник не є настільки точним, як запропонова ні алгоритми.

Висновки: За результатами аналізу, визначено, що з оглядом на конкурентну ситуацію, на ринку можна працювати. Конкуренція у галузі поки що практично відсутня, можуть з'явитись потенційні конкуренти. Постачальники не диктують умов на ринку. Є специфічні умови з боку деяких потенційних клієнтів. Товари-замінники не зможуть задовольнити потреби користувачів. Проект повинен мати такі сильні сторони: точність, високу швидкодію, надійність, відповідність потрібним стандартам, щоб отримувати сертифікацію.

4.3.6 На основі аналізу конкуренції, проведеного в п. 3.5 (табл. 4.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №4.6-4.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності (табл. 4.10).

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Точність	Алгоритми компенсації дрейфів ММГ, що забезпечують необхідну точність систем
2	Адаптивність	Можливість використання системи при різноманітних умовах
3	Швидкодія	Висока швидкодія системи, як наслідок – якість вихідного корисного ефекту
4	Надійність	Система працює стабільно при різноманітних зовнішніх чинниках
5	Сертифікованість	Відповідність необхідним стандартам, для отримання сертифікатів за потребою потенційних клієнтів

Висновки: Визначено основні фактори конкурентоспроможності, які полягають у точності, адаптивності, швидкодії, надійності і сертифікованості, а також наведено обґрунтування, яке показує сильні сторони проекту і те, як ці сильні сторони можуть бути корисними потенційному клієнту при використанні товару в порівнянні з товарами-конкурентами.

4.3.7 За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з виробниками ММГ						
			3	2	1		1	2	3
1	Наявність патентів	20							
2	Точність	20							
3	Надійність	19							
4	Технічна підтримка	19							
5	Сертифікованість	19							

Висновки: У порівнянні з товаром-конкурентом були визначені наступні сильні сторони, які полягають у наявності патентів, точності. Більш слабкі сторони

полягають у сертифікованості і надійності, оскільки неможливо передбачити абсолютно всі впливи. Загалом товар є повністю конкурентоспроможним з існуючих.

4.3.8 Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (табл. 4.12).

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Найвища точність серед всіх існуючих аналогів</li> <li>2. Наявність всіх патентів</li> <li>3. Відповідність необхідним стандартам, для проходження сертифікації</li> <li>4. Можливість застосування у військовій сфері та медицині</li> </ol>	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оскільки продукт новий, його надійність до кінця не перевірена</li> <li>2. Неможливість забезпечити всіх користувачів повною технічною підтримкою на початкових етапах</li> </ol>
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Збільшення продажу;</li> <li>2. Отримання державних замовлень на отримання послуг;</li> <li>3. Вдосконалення системи</li> </ol> <p>Вихід на міжнародний ринок</p>	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Цінова конкуренція в зв'язку з появою нових гравців на ринку.</li> <li>2. Втрата потенційних клієнтів через недостатню технічну підтримку.</li> </ol>

Висновки: Проведено SWOT-аналіз, за яким були визначені можливі загрози і можливості, які передбачаються сильними та слабкими сторонами проекту. Загрози є, але вони більш пов'язані з тим, що продукт досить новий, і максимальна технічна підтримка нових користувачів не є головною метою, оскільки вся увага приділяється в першу чергу точності, адаптивності до різних факторів і легкості у використанні запропонованими алгоритмами.

4.3.9 За SWOT-аналізом розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок. І визначено оптимальний термін реалізації. (табл. 4.13).

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	12 міс.

2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	18 міс.
3	Стратегія виходу з ринку	Низька	6 міс.

Висновки: Після проведеного аналізу було обрано альтернативу – стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу. Це пов’язано з високою ймовірністю отримання ресурсів, а також досить стислих строків на реалізацію. Інші альтернативи значно програють по ймовірності отримання ресурсів, а виграш по часу, якщо розглядати таку альтернативу як стратегія виходу з ринку не корелює з ймовірністю отримання ресурсів.

#### 4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

4.4.1 Визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Військова промисловість	Одразу не готові, треба певний час на перевірку	високий	низька	важко
2	Авіаційне будівництво	Готові, якщо буде сертифікація	високий	низька	середньо
3	Суднобудування	Готові, якщо буде сертифікація	високий	низька	середньо
4	Автомобільна промисловість	Готові	високий	низька	просто
5	Робототехніка	Готові	високий	низька	просто
6	Медицина	Одразу не готові, треба певний час на перевірку	високий	низька	важко

7	Розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки	Готові	високий	низька	просто
Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення, що компанія буде працювати із автомобільною промисловістю, компаніями, що займаються розробкою навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніки, із суднобудівною та авіаційною промисловістю.					

Висновки: Проведено опис цільових груп потенційних клієнтів, визначено готовність споживачів сприйняти продукт, орієнтований попит в межах галузі, інтенсивність конкуренції і входу в сегмент. В якості цільових груп було обрано такі, що готові сприйняти товар без та з наявною сертифікацією, а також де середня і низька простота входу. Конкуренція в галузях низька. Оскільки буде проводитися робота відразу у декількох сферах, то обирається стратегія диференційованого маркетингу.

#### 4.4.2 Формування базової стратегії розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Стратегія диференційованого маркетингу.	- Використання нових досягнень - Задоволення вимог користувачів - Постійне вдосконалення	Стратегія диференціації

Висновки: Як базову стратегію розвитку було обрано стратегію диференціації, яка передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар особливим в порівнянні з товарами-конкурентами за певними характеристиками, іноді зважаючи на не досить важливі характеристики товару. Так буде більше уваги приділятися високій точності, адаптивності та спрощенню у використанні, але менше технічній підтримці (оскільки цей фактор буде не суттєвим при виконанні трьох попередньо зазначених).

#### 4.4.3 Вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Проект є «першопрохідцем» на ринку	Так, будуть вестися пошуки нових споживачів, аналізуватися нові групи потенційних клієнтів, а також переманюватися у конкурентів, за допомогою пропонування кращого продукту.	Не буде проводитись копіювання, а навпаки буде впроваджено покращення і вдосконалення потрібних характеристик	Стратегія виклику лідера

Висновки: За стратегію конкурентної поведінки було обрано стратегію виклику лідера, яка полягає у протистоянні лідеру, завдяки створенню конкурентоспроможного товару, який у загальній кількості характеристик може зайняти найвищу позицію на ринку, і стати одним із найпривабливіших для клієнтів. Також проект є першопрохідцем на ринку. Основні характеристики товару конкурента не будуть копіюватись, а навпаки вдосконалюватись.

4.4.4 На основі вимог споживачів до постачальника та до продукту, в залежності від обраних стратегій конкурентної поведінки та базової стратегії розвитку розробляється стратегія позиціонування (табл. 4.17).

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Точність системи	Стратегія диференціації	Найвижча точність.	Високоточна, стабільна.



2	Адаптивність до різноманітних умов	Стратегія диференціації	Універсальність	Адаптивна до будь-яких обставин, універсальна
3	Надійність впродовж часу роботи	Стратегія диференціації	Якість	Надійна
4	Простота у використанні	Стратегія диференціації	Простота	Проста, легка, зрозуміла
5	Вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів	Стратегія диференціації	Формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.	Якість. Ціна. Зворотній зв'язок із виробником. Технічна підтримка.

Висновки: Сформульовано позицію власного проекту, це три ключові поняття: високоточна, надійна і проста у використанні система. Такий висновок зроблено на основі аналізу головних вимог цільової аудиторії до розроблюваного товару, якими було обрано точність системи, простоту у використанні, адаптивність, а також надійність системи впродовж часу роботи і вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів. Базовою стратегією було обрано стратегію диференціації.

#### 4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

4.4.1 Формування маркетингової концепції товару, яку отримає споживач (табл. 4.18).

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Необхідність компенсації дрейфів ММГ з метою отримання максимально точних даних	Алгоритм має найвищі показники точності серед всіх можливих аналогів. Він також є адаптивним до різноманітних факторів, простим у використанні.	Максимальна точність, адаптивність, надійність, проста у використанні, підтримка споживача, можливість широкого використання.

Висновки: Як видно з табл. 4.18, для потенційного споживача існує досить багато переваг, які полягають у максимальній точності, адаптивності, надійності, прості у використанні, підтримці споживача, можливості широкого використання.

відносно товарів конкурентів. Деякі характеристики і можливості товари-конкуренти взагалі не можуть запропонувати у такій якості потенційному користувачеві.

#### 4.4.2 Трирівнева маркетингова модель товару: (табл. 4.19).

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Продукт дає можливість компенсувати дрейфи ММГ і отримати максимально точні дані на виході. Ці алгоритми дуже легко впроваджувати в системне забезпечення самих гіроскопів у вигляді спеціального коду, що робить їх простими і зрозумілими у використанні.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Точність компенсації	1. 0.03°/с	1. Тх
	2. Швидкість роботи алгоритмів	2. Залежить від роботи мікропроцесора	2. Тх
	3. Надійність впродовж часу роботи	3. -	3. Тх
	4. Простота у використанні	4. Нм	4. Тл
	Якість: відповідає нормам ISO		
Пакування: програмне забезпечення			
Марка: проект «Алгоритми компенсації дрейфів мікромеханічних гіроскопів»			
III. Товар із підкріпленням	До продажу: отримання спеціальної консультації щодо встановлення програмного забезпечення та його використання		
	Після продажу: Гарантійне обслуговування, сервісна підтримка.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Завдяки патентуванню винаходу.			

Висновки: Зроблено опис трьох рівнів моделі товару, за яким легко зрозуміти призначення товару та які проблемні задачі він вирішує, основні властивості та технічні характеристики які може запропонувати даний товар, основні сертифікації товару, а також яка підтримка може очікувати цільового користувача до та після покупки. Захист товару від копіювання буде зроблено завдяки патентуванню.

#### 4.4.3 Визначення цінових меж для встановлення ціни на потенційний товар (табл. 4.20).

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
-------	--------------------------------	------------------------------	--	---

1	1000-200 ум.од.	500 – 4000 ум.од.	10000-15000 ум.од.	Нижня межа: 2500 ум.од. Верхня межа: 3500 ум.од.
---	-----------------	-------------------	--------------------	---

Висновки: Встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють від 2500 до 3500 ум.од. Ціна є оптимальною для запропонованих користувачу характеристик, і знаходиться на рівні товарів-конкурентів. Ціна базувалась на собівартості розробки програмного забезпечення, а також враховано унікальність даних алгоритмів. Визначено рівень доходів цільової групи споживачів, але треба зазначити, що ці системи не на широку аудиторію, тобто їх основними споживачами є великі компанії.

#### 4.4.4 Визначення оптимальної системи збуту (табл. 4.21).

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Роздрібна закупівля	Супровід товару на всьому етапі доставки до кінцевого споживача.	Канал одного рівня	Підприємства роздрібною торгівлі
2	Оптова закупівля	Супровід товару на всьому етапі доставки до кінцевого споживача, з додатковими умовами і бонусами.	Дворівневий канал	Підприємства оптової торгівлі
3	Орендування	Консультація щодо використання обладнання	Канал нульового рівня	Підприємства від виробника

Висновки: Встановлено глибини каналу збуту та оптимальні системи збуту за специфікою закупівельної поведінки цільових клієнтів. Основні це роздрібна закупівля, оптова закупівля та орендування. Визначено функції збуту, які повинен виконувати постачальник товару. Визначено, через що оптимально реалізовувати збут при різних специфіках закупівельної поведінки цільових клієнтів.

#### 4.4.5 Розроблення концепції маркетингових комунікацій (табл. 4.22).

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
-----	---------------------------------------	--	--	----------------------------------	--------------------------------

1	Знайти можливість швидко та зручно компенсувати дрейфи ММГ для отримання більш точних вихідних даних	Інтернет, телефон, відвідування наукових форумів, презентацій	Точність, швидкість, адаптивність	Приваблення нових цільових клієнтів	Розповісти про новий підхід до компенсації дрейфів ММГ та отримання з їх допомогою більш точних даних = вдосконалення роботи всіх гіроскопів.
---	--	---	-----------------------------------	-------------------------------------	---

**Висновки:** Розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка буде полягати у привабленні нових цільових клієнтів, за допомогою інтернету, телефону та проведенні спеціальних наукових форумів і презентацій, які обрані основними каналами комунікацій, шляхом розміщення рекламного звернення, де буде розповідатись про новий підхід до компенсації дрейфів мікромеханічних гіроскопів та отримання з їх допомогою більш точних даних.

#### **Висновки до розділу 4**

При розробці стартап-проекту було пророблено всі етапи, необхідні для правильного аналізу ринку, потенційних клієнтів, конкурентоспроможності, факторів ризику та можливостей, вибору правильних стратегій для впровадження стартап-проекту на ринок, для того, щоб він став успішним.

Визначено основні напрямки застосування та вигоду для користувачів, а також сильні та слабкі сторони проекту у порівнянні з товарами-конкурентами. На основі цього було виявлено, що на товар існує досить великий попит у різноманітних сферах, таких, як авіабудування, морська справа, військова промисловість, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання, робототехніка, медицина.

Товар має досить гарні показники у порівнянні з товарами-конкурентами. Проведено технологічний аудит проекту для вибору правильної технології реалізації ідеї проекту. Було обрано технологію - підвищення точності системи, що є більш привабливим для користувачів, тому що отримані показники будуть максимально точними.

Проведено аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту, за яким було виявлено, що ринок є дуже привабливим для входу, а середній рівень рентабельності у галузі є високим. Визначено основні цільові аудиторії клієнтів, а також головні відмінності між ним. Основним ризиком загроз обрано зріст конкуренції, внаслідок чого може початися втрата клієнтів. А основною можливістю є зростання попиту, що призведе до збільшення виробництва. Проаналізовано основні риси конкуренції на ринку і визначено, що конкуренція у галузі є невеликою, є можливості виходу на міжнародний ринок, а використання товару можливе у різноманітних сферах.

За результатами аналізу за моделлю М. Портера, визначено, що з оглядом на конкурентну ситуацію, на ринку можна працювати. Конкуренції у галузі практично не існує, проте в майбутньому можуть з'явитись потенційні конкуренти. Постачальники не диктують умов на ринку. Є специфічні умови з боку деяких потенційних клієнтів.

Товари-замінники не зможуть задовольнити потреби користувачів. Визначено фактори конкурентоспроможності за якими проведено аналіз сильних та слабких сторін проекту: наявність патентів, висока точність. Більш слабкі сторони полягають у сертифікованості і надійності, оскільки неможливо передбачити абсолютно всі впливи. Загалом товар є повністю конкурентоспроможним з існуючих. Після проведеного SWOT – аналізу було обрано альтернативу ринкової поведінки – стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу. Розроблено ринкову стратегію проекту. Як цільові групи обрано: автомобільну промисловість, компанії, що займаються розробкою навігаційного обладнання, робототехніки, авіаційне будівництво, суднобудування. Як базову стратегію розвитку було обрано стратегію диференціації. Обрано стратегію конкурентної поведінки – стратегія лідера. Сформульовано позицію власного проекту, це три ключові поняття: високоточний, надійний і простий у використанні алгоритм. Розроблено маркетингову програму стартап-проекту, за якою встановлено, що для потенційного користувача товару є багато переваг, які не можуть запропонувати конкуренти.

Встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють від 2500 до 3500 ум.од. Ціна є оптимальною і знаходиться на рівні товарів-конкурентів. Встановлено глибини каналу збуту та оптимальні системи збуту і розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка буде полягати у привабленні нових цільових клієнтів.

Із зазначеного вище зроблено висновки, що подальша імплементація проекту є цілком доцільна.

## **ВИСНОВКИ**

1. Проведено огляд стану проблеми підвищення точності мікромеханічних гіроскопів. Проаналізувавши попередні дослідження, виявлено, що похибки ММГ викликані дією зовнішніх впливів, насамперед зміною температури середовища, що викликає дрейф зміщення нульового сигналу, який необхідно компенсувати. Розглянувши можливі методи компенсації, виявлено, що актуальною є проблема алгоритмічної компенсації температурних дрейфів ММГ, а тому це є дуже важливим і перспективним напрямком досліджень.

2. Проведено аналіз традиційних та сучасних методів алгоритмічної компенсації. Встановлено, що сучасні методи апроксимації, такі як застосування штучних нейронних мереж можуть суттєво покращити точність компенсації температурних похибок.

Використовуючи отримані знання було розроблено алгоритми з використанням різних типів ШНМ: зворотного поширення помилки та радіальних базисних функцій. В процесі роботи було встановлено, що недоліками таких алгоритмів є застосування двох ШНМ для компенсації окремо масштабного коефіцієнта та зміщення нуля, тому було запропоновано алгоритм поєднання калібрування вихідного сигналу та компенсації температурних дрейфів ММГ однією штучною нейронною мережею.

3. Для експериментальної перевірки та порівняння ефективності розглянутих і запропонованих методів було проведено їх моделювання з використанням реальних сигналів датчика кутової швидкості.

Для визначення основних параметрів та їх залежності від температури проведено калібрування обраного ДКШ та температурні випробування, що показали необхідність компенсації температурних похибок, які в більшій мірі залежать від зміни та напрямку зміни температури, та майже не залежать від швидкості її зміни.

Порівняння розроблених алгоритмів компенсації з традиційними показали їх вищу ефективність. При цьому запропонований метод з використанням однієї ШНМ не поступається традиційному калібруванню вихідного сигналу ММГ, та має кращу точність компенсації. Таким чином поставлене завдання покращення точності ММГ за рахунок компенсації температурних дрейфів було досягнуто.

Майбутнім перспективним напрямком дослідження використовуючи отримані в роботі результати може бути створення «універсального» алгоритму компенсації температурних дрейфів ММГ з використанням основних властивостей штучних нейронних мереж, які дозволили б покращити характеристики ММГ низької точності без необхідності температурного калібрування.

4. Було проведено розробку стартап-проекту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тимошенко А.С. Исследование и разработка методов расширения рабочего диапазона и улучшения характеристик микромеханических датчиков угловой скорости. : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.27.01; [Место защиты: Нац. исслед. ун-т МИЭТ]. - Москва, 2012. - 28 с.
2. Воробьев В.А. Нелинейные эффекты в динамике микромеханических гироскопов : Дис. ... канд. техн. наук : 01.02.01 Москва, 2006 119 с.
3. Барбин Е.С. Динамика многокомпонентного микромеханического гироскопа-акселерометра с развязывающими рамками : дис. ... кандидата Технические наук: 05.27.01 ;[Место защиты: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»], 2016. - 184 с.
4. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Лестев А.М., Попова И.В. Расчет температурных и технологических погрешностей микромеханических гироскопов // Нано- и микросистемная техника: Сб. статей.- М., Техносфера, 2005 –С. 342-357.
5. Евстифеев М.И., Елисеев Д.П., Ковалёв А.С., Розенцвейн Д.В. Результаты испытаний ММГ при механических воздействиях // Гироскопия и навигация.- 2011.- №1(72).-С. 49-58.
6. Матвеев В.В., Погорелов М.Г. Анализ погрешностей микромеханических гироскопов методом вариации Аллана // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 3. С. 123-135.
7. Wang X., Wu W., Fang Z., Luo B., Li Y., Jiang Q, Temperature Drift Compensation for Hemispherical Resonator Gyro Based on Natural Frequency // Sensors.-2012.- №.12.- pp. 6434-6446.
8. Ивойлов А.Ю. О применении МЭМС-датчиков при разработке системы автоматической стабилизации двухколесного робота // Сборник научных трудов НГТУ.-2017.-№ 3 (89).С. 32-51.



9. Новацький А.О. Комплементарний фільтр для квадрокоптера з компенсацією температурного дрейфу нуля датчика кутової швидкості / А.О. Новацький, П.Є. Коломійцев, П.О. Сапсай // Молодий вчений. - 2014. - № 5(1). - С. 15-18.
10. Беляев С.Н. Методика компенсации дрейфа нуля и моделирование шумов микромеханического гироскопа инерциального измерительного блока / С.Н. Беляев, А.Е. Истомин // Військово-технічний збірник. - 2010. - Вип. 3. - С. 48-51.
11. Byung Su Park, KyungJun Han, SangWoo Lee, MyeongJong Yu, "Analysis of compensation for a g-sensitivity scale-factor error for a MEMS vibratory gyroscope", Micromechanics and Microengineering, Vol. 25, Num. 11, 2015.
12. Мелешко В.В., Нестеренко О.И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Учебное пособие – Кировоград : Полимед – Сервис, 2011. – 172 с.
13. Yeşim Günhan, Derya Ünsal, "Polynomial Degree Determination for Temperature Dependent Error Compensation of Inertial Sensors", IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS 2014, pp. 1209-1212, 2014.
14. Baiqiang Zhanga, Hairong Chua, Tingting Suna, Lihong Guoa, "Thermal calibration of a tri-axial MEMS gyroscope based on Parameter-Interpolation method", Sensors and Actuators A: Physical Vol. 261, pp. 103-116, 1 July 2017.
15. Yang H., Zhou B., Wang L., Xing H., Zhang R., "A Novel Tri-Axial MEMS Gyroscope Calibration Method over a Full Temperature Range", Sensors, Vol. 18, pp. 3004, 2018 Sep.
16. Rita Fontanella, Domenico Accardo, Rosario Schiano Lo Moriello, Leopoldo Angrisani, Domenico De Simone, "MEMS Gyros Temperature Calibration through Artificial Neural Networks", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 279, pp. 553-565, 15 August 2018.
17. Qintuo Zhang, Zhenfan Tan, Lidong Guo. "Compensation of temperature drift of MEMS gyroscope using BP neural network", 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science, pp. 1-4, 2009.

- 18.J. K. Shiau et al., "MEMS Gyroscope Null Drift and Compensation Based on Neural Network", Advanced Materials Research, Vols. 255-260, pp. 2077-2081, 2011.
- 19.Rita Fontanella, Domenico Accardo, Egidio Caricati, Stefano Cimmino, Domenico De Simone, "An extensive analysis for the use of back propagation neural networks to perform the calibration of MEMS gyro bias thermal drift"2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS ), pp. 672-680, 2016.
- 20.Golrokh Araghi, René Jr Landry, "Temperature compensation model of MEMS inertial sensors based on neural network", 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), pp. 301-309, 2018.
- 21.Shen Chong, Song Rui, Li Jie, Zhang Xiaoming, Tang Jun, Shi Yunbo, Liu Jun, Cao Huiliang, "Temperature drift modeling of MEMS gyroscope based on genetic-Elman neural network", Mechanical Systems and Signal Processing, Vols. 72–73, pp. 897-905, May 2016.
- 22.Muhammad Ali, "Compensation of Temperature and Acceleration effects on MEMS Gyroscope", 2016 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), pp. 274-279, 2016.
- 23.Farid Gulmammadov, "Analysis, modeling and compensation of bias drift in MEMS inertial sensors", 2009 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, pp. 591-596, 2009.
- 24.Q.J. Tang, X.J. Wang, Q.P. Yang, C.Z. Liu, "Static temperature analysis and compensation of MEMS gyroscopes", Int. J. Metrol. Qual. Eng. Vol. 4, Num. 3, pp. 209-214, 06 March 2014.
- 25.Нестеренко О.І., Баланчук В.Є. Новітні прилади орієнтації і навігації: Лабораторний практикум для студентів напряму підготовки 051003 «Приладобудування» спеціальності 7.05100303 «Прилади і системи орієнтації та навігації» приладобудівного факультету / Уклад.: О. І. Нестеренко, В. Є. Баланчук – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 74 с.
- 26.Иванова Т.В. Численные методы в оптике. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2017 - 84 с.

27. Береславский Э.Н. , Далингер Я.М. , Павлов В.Д. , Соловьева Т. В. Численные методы. Учебное пособие/Университет ГА. С.-Петербург, 2014.
28. Гурский Д.А., Турбина Е.С. Вычисления в Mathcad 12. — СПб.: Питер, 2006. — 544 с.
29. Новотарський М.А., Нестеренко Б.Б. Штучні нейронні мережі: обчислення // Праці Інституту математики НАН України. – Т50. – Київ: Ін-т математики НАН України, 2004. – 408 с.
30. Филатова Т.В. Применение нейронных сетей для аппроксимации данных // Вестн. Том. гос. ун-та. 2004. № 284. С. 121–125.
31. Теорема Колмогорова-Арнольда - Хехт-Нильсена [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://lektsii.org/12-28326.html>
32. Алгоритм обучения многослойной нейронной сети методом обратного распространения ошибки (Backpropagation) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://lektsii.org/12-28326.html>. <https://habr.com/post/198268/>
33. Обработка данных искусственными нейронными сетями (ИНС). Лекция 8. Радиальные базисные сети [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [elib.bsu.by/bitstream/123456789/7605/8/NeiroTECN8.ppt](http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/7605/8/NeiroTECN8.ppt)
34. Гулаков К.В. Выбор архитектуры нейронной сети для решения задач аппроксимации и регрессионного анализа экспериментальных данных. Вестник брянского государственного технического университета. Номер: 2 (38) 2013 95-105.
35. Способы нормализации переменных. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://neuronus.com/theory/nn/925-sposoby-normalizatsii-peremennykh.html>
36. MEMS Quartz Angular Rate Sensor LCG50 [Электронный ресурс] : Datasheet / Systron Donner Inertial. – Электронные данные. – Режим доступу: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/wpcontent/uploads/2013/05/LCG50-Gyroscope-Datasheet.pdf>
37. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів

інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

## ДОДАТОК А

Лістинг програми для дослідження алгоритмічної компенсації дрейфів ММГ.

### Керуюча програма:

```
clear all; clc; close all;
global phi g u f gyro_num temp_num N M gyro_coeff
% послідовність температур в масиві [+10 +25 +30 +40 +50 -10 -20 0]
% послідовність кут. шв. в масиві [300 250 200 150 100 80 60 40
% 0 -40 -60 -80 -100 -150 -200 -250 -300]
% ініціалізація констант
phi = deg2rad(50.4172);
g = 9.78049*(1+0.0052884*(sin(phi))^2-0.0000059*(sin(2*phi))^2);
u = 7.292115*10^(-5);
% ініціалізація параметрів
f = 100; % частота опитування ЧЕ
gyro_num = 4; % номер ДКШ в збірці
temp_num = 8; % кількість температур калібрування
N = 17; % кількість точок калібрування на пов. ст.
M = 8; % кількість точок калібрування на ОДГ
%----- Інтеграція даних в матлаб -----%
% Шлях до каталогів
pname_RT = 'G:\!!!Master Diploma\exp. data (average)\Gclb\';
pname_ODH = 'G:\!!!Master Diploma\exp. data (average)\AGclb\';
gyro_data = read_data_fun(gyro_num, pname_RT);
acc_data = read_data_fun(gyro_num, pname_ODH);
%----- Розрахунок калібр. параметрів ДКШ -----%
gyro_coeff = zeros(temp_num, 3);
Kg = zeros(temp_num, 1);
omega = [300, 250, 200, 150, 100, 80, 60, 40, 0, -40, -60, -80, ...
-100, -150, -200, -250, -300]; % масив кут. шв. поворот. ст.
for i = 1:temp_num
    [Kz, Uwz0, b_zz, temp_gyro_RT, ...
    temp_gyro_ODH] = Gclb_fun(i, omega, gyro_data, acc_data);
    gyro_coeff(i, 1:4) = [Kz, Uwz0, b_zz, temp_gyro_RT];
end
%----- Оцінка точності калібрування -----%
[delta_omega] = estim_of_the_gyro_calib_fun(omega, gyro_data); %2D
[~] = error_surf_plot(omega, delta_omega); %3D
%----- Графік гістерезису -----%
pname_cross = 'G:\!!!Master Diploma\exp. data (average)\crossing in temperature
range\';
cross_data = read_data_fun(gyro_num, pname_cross);
cross_data = cross_data(100:end, :);
[~] = hysteresis_fun(cross_data);
%----- Побудова варіації Аллана -----%
hk = 1/f;
pname_av = 'G:\!!!Master Diploma\exp. data (average)\AV\';
av_data = read_data_fun(gyro_num, pname_av);
[~] = AV_fun(av_data, hk);
%----- Кусочно-лінійна інтерполяція -----%
flag_pl = 2; % кус.-лін. апрокс. 1 - при трьох знач. темп., 2 - при восьми знач.
темп.
gyro_clb_data_pw = piecewise_linear_fun(cross_data, flag_pl);
[~] = gyro_output_fun(gyro_clb_data_pw);
%----- Апроксимація поліномом різних порядків -----%
deg_s = 2; % порядок апроксимуючого полінома [2, 3, 7]
gyro_clb_data_sl = spline_fun(cross_data, deg_s);
[~] = gyro_output_fun(gyro_clb_data_sl);
```

```

%----- Інтерполяція поліномом Лагранжа -----%
deg_i = 3; % кількість вузлів [3, 4, 8]
gyro_clb_data_ip = interpol_fun(cross_data, deg_i);
[~] = gyro_output_fun(gyro_clb_data_ip);
% ----- Компенсація ШНМ -----%
ntp = 3; % кількість точок калібрування [3 8]
type_NN = 'RBF'; % архітектура ШНМ ['BP' 'RBF']
noise = true; % додавання у вибірку зашумлених сигналів [true false]
type_norm = 'minmax'; % метод нормалізації ['minmax' 'constant' 'Zscore' 'def']
flag_SF = true; % компенсація масштабного коеф. ['true' 'false']
gyro_clb_data_NN = NN_fun(cross_data, ntp, type_NN, noise, type_norm, flag_SF);
[~] = gyro_output_fun(gyro_clb_data_NN);
% ----- Використання ШНМ для калібрування вихідного сигналу
% та компенсації температурних дрейфів -----%
gyro_clb_data_NN_full = NN_clb_fun(gyro_data, cross_data);
[~] = gyro_output_fun(gyro_clb_data_NN_full);
% ----- Дослідження впливу градієнта температури -----%
pname_grad = 'G:\!!!Master Diploma\exp. data (average)\temperature gradient new\';
grad_data = read_data_fun(gyro_num, pname_grad);
grad_data = grad_data(:, :, 100:end);
[~] = temp_grad_fun_new(grad_data, cross_data);
ext = input('Для завершення натисніть Enter');
if isempty(ext)
    close all
end
end

```

### Функція визначення параметрів моделі вихідного сигналу ММГ:

```

function [Kz, Uwz0, b_zz, temp_gyro_RT,...
    temp_gyro_ODH] = Gclb_fun(i, omega, gyro_data, acc_data)
    % Функція розрахунку параметрів вих. сигн. ДКШ
    global g phi u
    U_gyro_RT = gyro_data(i, 5:21, 1)'; % В діапазоні +300...-300 град/с
    temp_gyro_RT = mean(gyro_data(i, 5:21, 2));

    U_gyro_ODH = acc_data(i, :, 1)';
    temp_gyro_ODH = mean(acc_data(i, :, 2));

    % розрахунок коефіцієнтів
    Kz = U_gyro_RT'*omega'/(omega*omega');
    Uwz0 = 1/8*sum(U_gyro_ODH);
    b_zz = (U_gyro_ODH(1)-U_gyro_ODH(3))/(2*g)-(Kz*rad2deg(u)*sin(rad2deg(phi))/g);
end

```

### Функція кусково-лінійної інтерполяції:

```

function [gyro_clb_data] = piecewise_linear_fun(gyro_data, flag)
    %Функція кусочно-лінійної апроксимації
    global g temp_num gyro_coeff
    gyro_out = gyro_data(:, 1);
    gyro_T = gyro_data(:, 2);
    K = gyro_coeff(:, 1);
    U0 = gyro_coeff(:, 2);
    bz = gyro_coeff(:, 3);
    T = gyro_coeff(:, 4);
    gyro_clb = zeros(length(gyro_out), 1);
    if (flag == 1)
        % При трьох значеннях температури
        % [(-20) - (+20)]
        dTm = T(2) - T(7);
    end

```

```

dU0m = U0(2) - U0(7);
dKm = K(2) - K(7);
% [(+50) - (+20)]
dTp = T(5) - T(2);
dU0p = U0(5) - U0(2);
dKp = K(5) - K(2);
a1(1, 1) = dU0m/dTm;
a1(2, 1) = dU0p/dTp;
a1(1, 2) = U0(7)-a1(1, 1)*T(7);
a1(2, 2) = U0(2)-a1(2, 1)*T(2);
b1(1, 1) = dKm/dTm;
b1(2, 1) = dKp/dTp;
b1(1, 2) = K(7)-b1(1, 1)*T(7);
b1(2, 2) = K(2)-b1(2, 1)*T(2);
for k = 1:length(gyro_out)
    dT = gyro_T(k);
    if dT < T(2)
        j = 1;
    elseif dT > T(2)
        j = 2;
    end
    U0_aprox = a1(j, 2)+a1(j, 1)*dT;
    K_aprox = b1(j, 2)+b1(j, 1)*dT;
    gyro_clb(k, 1) = (gyro_out(k)-U0_aprox-bz(2)*g)/K_aprox;
end
type = 'pll';
elseif (flag == 2)
    % При восьми значеннях температури
    m = temp_num-1; % кількість участків
    del_U = zeros(m, 1);
    del_T = zeros(m, 1);
    del_K = zeros(m, 1);
    a1 = zeros(m, 1);
    b1 = zeros(m, 1);

    ts = [7 6 8 1 2 3 4 5]; % [-20 -10 0 +10 +20 +30 +40 +50]
    for i = 1:(temp_num-1)
        del_U(i) = U0(ts(i+1))- U0(ts(i));
        del_T(i) = T(ts(i+1))-T(ts(i));
        del_K(i) = K(ts(i+1))-K(ts(i));

        a1(i, 1) = del_U(i)/del_T(i);
        a1(i, 2) = U0(ts(i))- a1(i, 1)*T(ts(i));
        b1(i, 1) = del_K(i)/del_T(i);
        b1(i, 2) = K(ts(i))- b1(i, 1)*T(ts(i));
    end
    for k = 1:length(gyro_out)
        dT = gyro_T(k);
        if (dT < T(6)) % dT < -10
            j = 1;
        elseif (dT >= T(6) && dT < T(8)) % -10 < dT < 0
            j = 2;
        elseif (dT >= T(8) && dT < T(1)) % 0 < dT < +10
            j = 3;
        elseif (dT >= T(1) && dT < T(2)) % +10 < dT < +20
            j = 4;
        elseif (dT >= T(2) && dT < T(3)) % +20 < dT < +30
            j = 5;
        elseif (dT >= T(3) && dT < T(4)) % +30 < dT < +40
            j = 6;
        elseif (dT >= T(4)) % +40 < dT < +50
            j = 7;
        end
    end
end

```

```

        end
        U0_aprox = a1(j, 2)+a1(j, 1)*dT;
        K_aprox = b1(j, 2)+b1(j, 1)*dT;
        gyro_clb(k, 1) = (gyro_out(k)-U0_aprox-bz(2)*g)/K_aprox;
    end
    type = 'p12';
end
temp_gyro_coeff = [a1 b1];
[~] = estim_of_the_gyro_comp_fun(temp_gyro_coeff, type, flag);
gyro_T_clb = thermo_sensor_calib_fun(gyro_T);
gyro_clb_data(:, 1:2) = [gyro_clb gyro_T_clb];
end

```

### Функція інтерполяції многочленом Лагранжа:

```

function [gyro_clb_data] = interpol_fun(gyro_data, deg)
%Функція інтерполяції поліномом Лагранжа
global g gyro_coeff
gyro_out = gyro_data(:, 1);
gyro_T = gyro_data(:, 2);
K = gyro_coeff(:, 1);
U0 = gyro_coeff(:, 2);
bz = gyro_coeff(:, 3);
T = gyro_coeff(:, 4);
if (deg == 3)
    x = [T(7) T(2) T(5)];
    y = [U0(7) U0(2) U0(5)];
    y1 = [K(7) K(2) K(5)];
elseif (deg == 4)
    x = [T(7) T(8) T(2) T(5)];
    y = [U0(7) U0(8) U0(2) U0(5)];
    y1 = [K(7) K(8) K(2) K(5)];
elseif (deg == 8)
    x = [T(7) T(6) T(8) T(1:5)'];
    y = [U0(7) U0(6) U0(8) U0(1:5)'];
    y1 = [K(7) K(6) K(8) K(1:5)'];
end
len = length(gyro_out);
gyro_clb = zeros(len, 1);
kof = zeros(2, len);
U0_ipol = zeros(len, 1);
K_ipol = zeros(len, 1);
xx = gyro_T;
yy = [y; y1];
% Спосіб 1 (для 3 темп.)
for i = 1:len
    L0 = ( (xx(i)-x(2))*(xx(i)-x(3)) ) / ( (x(1)-x(2))*(x(1)-x(3)) );
    L1 = ( (xx(i)-x(1))*(xx(i)-x(3)) ) / ( (x(2)-x(1))*(x(2)-x(3)) );
    L2 = ( (xx(i)-x(1))*(xx(i)-x(2)) ) / ( (x(3)-x(1))*(x(3)-x(2)) );
    L = [L0 L1 L2];
    kof(:, i) = sum(L.*yy, 2);
    gyro_clb(i) = (gyro_out(i)-kof(1, i)-bz(2)*g)/kof(2, i);
end
% Спосіб 2 (ітераційний метод - Схема Ейткена)
n = length(x);
for t = 1:len
    P1 = zeros(n);
    P2 = zeros(n);
    P1(1, :) = y;
    P2(1, :) = y1;
    for j = 1:n-1

```



```

%           for i = j+1:n
%               P1(j+1, i) = ( P1(j, i)*(xx(t)-x(j)) - P1(j, j)*(xx(t)-x(i))
%               )/(x(i)-x(j));
%               P2(j+1, i) = ( P2(j, i)*(xx(t)-x(j)) - P2(j, j)*(xx(t)-x(i))
%               )/(x(i)-x(j));
%           end
%       end
%       U0_ipol(t) = P1(n, n);
%       K_ipol(t) = P2(n, n);
%   end

%   for i = 1:len
%       gyro_clb(i) = (gyro_out(i)-U0_ipol(i)-bz(2)*g)/K_ipol(i);
%   end
gyro_T_clb(:, 1) = thermo_sensor_calib_fun(gyro_T);
gyro_clb_data(:, 1:2) = [gyro_clb(:, 1) gyro_T_clb(:, 1)];
end

```

### Функція апроксимації МНК:

```

function [gyro_clb_data] = spline_fun(gyro_data, deg)
%Функція апроксимації поліномом
global g gyro_coeff

gyro_out = gyro_data(:, 1);
gyro_T = gyro_data(:, 2);

K = gyro_coeff(:, 1);
U0 = gyro_coeff(:, 2);
bz = gyro_coeff(:, 3);
T = gyro_coeff(:, 4);

gyro_clb = zeros(length(gyro_out), 1);

if (deg == 2)
    %Для 3-х т.
    del_T = [1 T(7) T(7)^2;
             1 T(2) T(2)^2;
             1 T(5) T(5)^2];
    del_U0 = [U0(7); U0(2); U0(5)];
    del_K = [K(7); K(2); K(5)];
%   % для екстраполяції
%   del_T = [T(6) T(2) T(4)];
%   del_U0 = [U0(6) U0(2) U0(4)];
%   del_K = [K(6) K(2) K(4)];
elseif (deg == 8)
    %Для 8-х т.
    del_T = [1 T(7) T(7)^2; 1 T(6) T(6)^2; 1 T(8) T(8)^2;
             1 T(1) T(1)^2; 1 T(2) T(2)^2; 1 T(3) T(3)^2;
             1 T(4) T(4)^2; 1 T(5) T(5)^2];
    del_U0 = [U0(7); U0(6); U0(8); U0(1:5)];
    del_K = [K(7); K(6); K(8); K(1:5)];
end
a1 = (del_T'*del_T)\del_T'*del_U0;
b1 = (del_T'*del_T)\del_T'*del_K;

%   %Варіант 2 (засобами MATLAB)
%   if (deg == 2)
%       del_T = [T(7) T(2) T(5)];
%       del_U0 = [U0(7) U0(2) U0(5)];
%       del_K = [K(7) K(2) K(5)];
%   elseif (deg == 3)
%       del_T = [T(7) T(8) T(2) T(5)];

```

```

%         del_U0 = [U0(7) U0(8) U0(2) U0(5)];
%         del_K = [K(7) K(8) K(2) K(5)];
%     elseif (deg == 7)
%         del_T = [T(7) T(6) T(8) T(1:5)'];
%         del_U0 = [U0(7) U0(6) U0(8) U0(1:5)'];
%         del_K = [K(7) K(6) K(8) K(1:5)'];
%     end
%     a1 = polyfit(del_T, del_U0, deg);
%     b1 = polyfit(del_T, del_K, deg);
for k = 1:length(gyro_out)
    dT = gyro_T(k);
    % Для варіанта 1
    if (flag == 2)
        U0_aprox = a1(1)+a1(2)*dT+a1(3)*dT^2;
        K_aprox = b1(1)+b1(2)*dT+b1(3)*dT^2;
    elseif (deg == 3)
        U0_aprox = a1(1)+a1(2)*dT+a1(3)*dT^2+a1(4)*dT^3;
        K_aprox = b1(1)+b1(2)*dT+b1(3)*dT^2+b1(4)*dT^3;
    elseif (deg == 7)
        U0_aprox = a1(1)+a1(2)*dT+a1(3)*dT^2+a1(4)*dT^3+a1(5)*dT^4+...
            a1(6)*dT^5+a1(7)*dT^6+a1(8)*dT^7;
        K_aprox = b1(1)+b1(2)*dT+b1(3)*dT^2+b1(4)*dT^3+b1(5)*dT^4+...
            b1(6)*dT^5+b1(7)*dT^6+b1(8)*dT^7;
    end
    % Для варіанта 2
    if (deg == 2)
        U0_aprox = a1(3)+a1(2)*dT+a1(1)*dT^2;
        K_aprox = b1(3)+b1(2)*dT+b1(1)*dT^2;
    elseif (deg == 3)
        U0_aprox = a1(4)+a1(3)*dT+a1(2)*dT^2+a1(1)*dT^3;
        K_aprox = b1(4)+b1(3)*dT+b1(2)*dT^2+b1(1)*dT^3;
    elseif (deg == 7)
        U0_aprox = a1(8)+a1(7)*dT+a1(6)*dT^2+a1(5)*dT^3+a1(4)*dT^4+...
            a1(3)*dT^5+a1(2)*dT^6+a1(1)*dT^7;
        K_aprox = b1(8)+b1(7)*dT+b1(6)*dT^2+b1(5)*dT^3+b1(4)*dT^4+...
            b1(3)*dT^5+b1(2)*dT^6+b1(1)*dT^7;
    end
    gyro_clb(k, 1) = (gyro_out(k)-U0_aprox-bz(2)*g)/K_aprox;
end
temp_gyro_coeff = [a1' b1'];
type = 'sl';
[~] = estim_of_the_gyro_comp_fun(temp_gyro_coeff, type, deg);
gyro_T_clb(:, 1) = thermo_sensor_calib_fun(gyro_T);
gyro_clb_data(:, 1:2) = [gyro_clb(:, 1) gyro_T_clb(:, 1)];
end

```

### Функція апроксимації ШНМ:

```

function [gyro_clb_data] = NN_fun(gyro_data, ntp, type_NN, noise, type_norm, flag_SF)
% Функція компенсації ШНМ
global g gyro_coeff
K = gyro_coeff(:, 1);
U0 = gyro_coeff(:, 2);
bz = gyro_coeff(:, 3);
Temp = gyro_coeff(:, 4);
gyro_out = gyro_data(:, 1);
gyro_temp = gyro_data(:, 2);
if (ntp == 3)
    P = [Temp(7) Temp(2) Temp(5)];
    T1 = [U0(7) U0(2) U0(5)];
    if (flag_SF)
        T2 = [K(7) K(2) K(5)];
    end
end

```

```

    end
elseif (ntp == 8)
    P = Temp';
    T1 = U0';
    if (flag_SF)
        T2 = K';
    end
end
if (noise == true)
    P = [P P+randn(size(P))*1e-2];
    T1 = [T1 T1];
    if (flag_SF)
        T2 = [T2 T2];
    end
end
if (contains(type_norm, 'minmax') == true)
    Pmin = min(P); Pmax = max(P);
    P = (P-Pmin)./(Pmax-Pmin);
    gyro_temp_norm = (gyro_temp-Pmin)./(Pmax-Pmin);
elseif (contains(type_norm, 'constant') == true)
    P = P./(10^(3.86));
    gyro_temp_norm = gyro_temp./(10^(3.86));
elseif (contains(type_norm, 'Zscore') == true)
    P_mean = mean(P);
    P_std = std(P);
    P = (P-P_mean)./P_std;
    gyro_temp_norm = (gyro_temp-P_mean)./P_std;
elseif (contains(type_norm, 'def') == true)
    P = P;
    gyro_temp_norm = gyro_temp;
end
if (contains(type_NN, 'BP') == true)
    net = newff(minmax(P), [3 1], {'logsig' 'purelin'}, 'trainlm', 'learngdm');
    net.performFcn = 'mse';
    net.trainParam.goal = 0.01;
    net.trainParam.lr = 0.01;
    net.trainParam.epochs = 1000;
    net.trainParam.min_grad = 1e-6;
    net.trainParam.mc = 0.95;
    net1 = train(net, P, T1);
    if (flag_SF)
        net2 = train(net, P, T2);
    end
elseif (contains(type_NN, 'RBF') == true)
    mse_goal = 0.1;
    spread = 2.5;
    max_neurons = 3;
    DF = 1;
    net1 = newrb(P, T1, mse_goal, spread, max_neurons, DF);
    if (flag_SF)
        net2 = newrb(P, T2, mse_goal, spread, max_neurons, DF);
    end
end
PP = gyro_temp_norm';
Y1 = sim(net1, PP);
U0_comp = Y1';
if (flag_SF)
    Y2 = sim(net2, PP);
    K_comp = Y2';
end
gyro_clb = zeros(length(gyro_out), 1);
for k = 1:length(gyro_temp)

```

```

        gyro_clb(k, 1) = (gyro_out(k)-U0_comp(k)-bz(2)*g)/K(2);
    if (flag_SF)
        gyro_clb(k, 1) = (gyro_out(k)-U0_comp(k)-bz(2)*g)/K_comp(k);
    end
end
type = 'NN';
if (flag_SF)
    net{1, 1} = net1;
    net{1, 2} = net2;
else
    net = net1;
end
[~] = estim_of_the_gyro_comp_fun(net, type, type_norm);
gyro_T_clb = thermo_sensor_calib_fun(gyro_temp);
gyro_clb_data(:, 1:2) = [gyro_clb(:, 1) gyro_T_clb(:, 1)];
end

```

### **Функція калібрування вихідного сигналу і компенсації похибок ШНМ:**

```

function [gyro_clb_data, delta_NN] = NN_clb_fun(gyro_data, omega, cross_data,...
                                                ntp, type_NN)

%Функція калібрування вихідного сигналу та компенсації температурних дрейфів
global N
N = N-5;
f2 = @(x, y, z) (x-y)./(z-y);
f3 = @(x, y, z) 2*((x-y)./(z-y))-1;
P_temp = zeros(N*ntp, 1)';
P_U = zeros(N*ntp, 1)';
T_U = zeros(N*ntp, 1)';
delta_NN = zeros(ntp, N+5);
j = 1;
if (ntp == 3)
    ind = [7 2 5];
elseif (ntp == 8)
    ind = 1:8;
end
gyro_dataT = gyro_data(:, 5:21, :);
omegaT = omega;
gyro_data = gyro_dataT;
gyro_data(:, [3, 7, 12, 15, 16], :) = [];
omega(:, [3, 7, 12, 15, 16]) = [];
for i = 1:ntp
    P_U(1, j:j+N-1) = gyro_data(ind(i), :, 1);
    P_temp(1, j:j+N-1) = gyro_data(ind(i), :, 2);
    T_U(1, j:j+N-1) = omega;
    j = j+N;
end
P_temp_norm = f2(P_temp, min(P_temp), max(P_temp));
P_U_norm = f3(P_U, min(P_U), max(P_U));
if (contains(type_NN, 'BP') == true)
    net = newff([minmax(P_temp_norm); minmax(P_U_norm)], [3 1], {'tansig'
'purelin'}, 'trainlm', 'learngdm');
    net.performFcn = 'mse';
    net.trainParam.goal = 0.01;
    net.trainParam.lr = 0.01;
    net.trainParam.epochs = 1000;
%    net.trainParam.min_grad = 1e-9;
    net.trainParam.mc = 0.95;
    net = train(net, [P_temp_norm; P_U_norm], T_U);
elseif (contains(type_NN, 'RBF') == true)
    mse_goal = 0.1;

```

```

        spread = 2.5;
        max_neurons = 100;
        DF = 1;
        net = newrb([P_temp_norm; P_U_norm], T_U, mse_goal, spread, max_neurons, DF);
%         neur_size = net.layers{1}.size
    end
    for i = 1:ntp
        U_gyro = gyro_dataT(ind(i), :, 1)';
        T_gyro = gyro_dataT(ind(i), :, 2)';
        T_gyro_norm = f2(T_gyro, min(P_temp), max(P_temp));
        U_gyro_norm = f3(U_gyro, min(P_U), max(P_U));
        Y = sim(net, [T_gyro_norm'; U_gyro_norm']);
        delta_NN(i, :) = Y-omegaT;
    end
    U_gyro_cross = cross_data(:, 1);
    T_gyro_cross = cross_data(:, 2);
    U_gyro_norm = f3(U_gyro_cross, min(P_U), max(P_U));
    T_gyro_norm = f2(T_gyro_cross, min(P_temp), max(P_temp));
    gyro_clb = sim(net, [T_gyro_norm'; U_gyro_norm']);
    gyro_T_clb = thermo_sensor_calib_fun(T_gyro_cross);
    gyro_clb_data(:, 1:2) = [gyro_clb(1, :)'; gyro_T_clb(:, 1)];
end

```

### Функція інтеграції експериментальних даних в MATLAB:

```

function [data] = read_data_fun(gyro_num, pname)
% Функція інтеграції даних
% Структура вих. масиву:
% для калібр.: data = [chamber_temp, RT_ang_vel., [gyro_data, gyro_temp]]
% для всіх інших: data = [gyro_data, gyro_temp]
pname_temp = dir(pname);
if (contains(pname, 'Gclb') == true || contains(pname, 'AGclb') == true...
    || contains(pname, 'sampling') == true)
    pname_temp = strrep(sort({pname_temp.name}), '.', '');
    pname_temp = pname_temp(~cellfun('isempty', pname_temp));
    for i = 1:length(pname_temp)
        pname_temp_files = dir(char(fullfile(pname, pname_temp(i), '*.txt')));
        for n = 1:length(pname_temp_files)
            fname = fullfile(pname_temp_files(n).folder,
pname_temp_files(n).name);
            [FName, ~] = fopen(fname, 'r');
            fgetl(FName);
            all_data = fscanf(FName, '%f', [4, inf]);
            data(i, n, :) = [all_data(2, gyro_num) all_data(4, gyro_num)];
            clear all_data fname;
            fclose(FName);
        end
    end
elseif (contains(pname, 'temperature gradient') == true...
    || contains(pname, 'frequencies') == true)
    pname_temp = strrep(sort({pname_temp.name}), '.', '');
    pname_temp = pname_temp(~cellfun('isempty', pname_temp));
    for i = 1:length(pname_temp)
        pname_temp_files = dir(char(fullfile(pname, pname_temp(i), '*.txt')));
        fname = fullfile(pname_temp_files.folder, pname_temp_files.name);
        [FName, ~] = fopen(fname, 'r');
        all_data = fscanf(FName, '%f', [18, inf]);
        data{i, 1} = all_data(gyro_num, :);
        data{i, 2} = all_data(gyro_num+9, :);
        clear all_data fname;
        fclose(FName);
    end
end

```

```

else
    files = dir(strcat(pname, '*.txt'));
    fname = fullfile(pname, files.name);
    [FName, ~] = fopen(fname, 'r');
    all_data = fscanf(FName, '%f', [18, inf]);
    data(:, 1) = all_data(gyro_num, :);
    data(:, 2) = all_data(gyro_num+9, :);
    clear all_data fname;
    fclose(FName);
end
end
end

```

### **Функція калібрування вихідного сигналу термодатчика ММГ:**

```

function [gyro_T_clb] = thermo_sensor_calib_fun(T_code)
    %Функція калібрування сигналу термодатчика
    SFadc = 8.0566e-04; %3.3/4096
    SF = 0.00625;
    B = 0.424;
    sft = 8;
    len = length(T_code);
    gyro_T_clb = zeros(len, 1);

    for k = 1:len
        gyro_T_clb(k, 1) = ((T_code(k)/sft)*SFadc-B)/SF;
    end
end

```

### **Функція обчислення похибок калібрування ММГ:**

```

function [delta_omega] = estim_of_the_gyro_calib_fun(omega, gyro_data)
    %Функція побудови графіків похибок калібрування
    %та залежності масштабного коеф. і зміщення нуля від темп.
    global g temp_num N gyro_coeff
    Kz = gyro_coeff(:, 1);
    U0 = gyro_coeff(:, 2);
    bz = gyro_coeff(:, 3);
    delta_omega = zeros(temp_num, N);
    U_gyro_clb = zeros(N, 1);
    omega = omega';
    % послідовність температур [-20 -10 0 +10 +20 +30 +40 +50]
    T_sbs = [7, 6, 8, 1, 2, 3, 4, 5];
    legend_arr = {'-20 ^\circC'; '-10 ^\circC'; '0 ^\circC'; '+10 ^\circC';...
        '+20 ^\circC'; '+30 ^\circC'; '+40 ^\circC'; '+50 ^\circC'};
    color_arr = {[0 0 1], [0 0.5 1], [0 1 1], [0.25 0.75 0], [0 0.75 0.25],...
        [1 0.75 0.25], [1 0 1], [1 0 0]};
    for i = 1:temp_num
        U_gyro_RT = gyro_data(i, 5:21, 1)';
        for n = 1:N
            U_gyro_clb(n, 1) = (U_gyro_RT(n)-U0(i)-bz(i)*g)/Kz(i);
            delta_omega(i, n) = U_gyro_clb(n, 1)-omega(n, 1);
        end
    end
end

% Kg = mean(delta_omega, 2);
scrsz = get(0, 'ScreenSize');
figure('Position', [300 150 scrsz(3)/2 scrsz(4)/1.5])
set(gcf, 'color', 'w');
for i = 1:temp_num
    plot(omega, delta_omega(T_sbs(i), :), 'Marker', 'o', 'Color',
        color_arr{i},...
        'MarkerSize', 2, 'LineWidth', 0.5);
end

```

```

        hold on;
    end
    title('Похибка вимірювання кутової швидкості ДКШ \Delta\omega_i',...
          'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12);
    xlabel('\omega_z_i, \circ/c', 'FontSize', 14);
    ylabel('\Delta\omega_i, \circ/c', 'FontSize', 14);
    set(gca, 'XGrid', 'on', 'XMinorGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'YMinorGrid', 'on');
    legend(legend_arr);
%     saveas(ffigure, strcat('temp calib error gyro #', 32, gyro_num), 'tiff');
    T_arr = [-20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50];
    K_arr = [gyro_coeff(7, 1), gyro_coeff(6, 1), gyro_coeff(8, 1), gyro_coeff(1,
1),...
            gyro_coeff(2, 1), gyro_coeff(3, 1), gyro_coeff(4, 1), gyro_coeff(5, 1)];
    U0_arr = [gyro_coeff(7, 2), gyro_coeff(6, 2), gyro_coeff(8, 2), gyro_coeff(1,
2),...
            gyro_coeff(2, 2), gyro_coeff(3, 2), gyro_coeff(4, 2), gyro_coeff(5,
2)];
    figure('Position', [300 150 scrsz(3)/2 scrsz(4)/1.5])
    set(gcf, 'color', 'w');
    subplot(2, 1, 1);
    plot(T_arr, K_arr, 'Marker', 'o', 'Color', [1 0 0],...
          'MarkerSize', 2, 'LineWidth', 0.5);
    title('Значення Kz в залежності від температури T',...
          'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12);
    ylabel('Масштаб. коеф. Kz, коди/\circ/c', 'FontSize', 12);
    set(gca, 'XGrid', 'on', 'XMinorGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'YMinorGrid', 'on');
%     saveas(ffigure, strcat('temp scale factor gyro #', 32, gyro_num), 'tiff');
    subplot(2, 1, 2);
    plot(T_arr, U0_arr, 'Marker', 'o', 'Color', [1 0 0],...
          'MarkerSize', 2, 'LineWidth', 0.5);
    title('Значення U_0 в залежності від температури T',...
          'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12);
    xlabel('Температура T, \circ C', 'FontSize', 12);
    ylabel('Зміщення нуля. U_0, коди', 'FontSize', 12);
    set(gca, 'XGrid', 'on', 'XMinorGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'YMinorGrid', 'on');
%     saveas(ffigure, strcat('temp bias gyro #', 32, gyro_num), 'tiff');
end

```

### Функція побудови графіка температурного гістерезису ММГ:

```

function [flag] = hysteresis_fun(cross_data)
%Функція побудови графіка гістерезиса ДКШ
global f
gyro_out = cross_data(:, 1);
T_out = cross_data(:, 2);
gyro_clb = gyro_out_calib_fun(gyro_out);
T_out_clb = thermo_sensor_calib_fun(T_out);
[~] = gyro_output_fun(gyro_clb, T_out_clb);
hk = f;
[k, ~] = size(cross_data);
gyro_out_aver_clb = zeros(fix(k/hk), 1);
T_out_aver_clb = zeros(fix(k/hk), 1);
for j = 1:(fix(k/hk))
    gyro_out_aver_clb(j) = mean(gyro_clb((hk*(j-1)+1):hk*j));
    T_out_aver_clb(j) = mean(T_out_clb((hk*(j-1)+1):hk*j));
end
scrsz = get(0, 'ScreenSize');
figure('Position', [300 150 scrsz(3)/2 scrsz(4)/1.5])
set(gcf, 'color', 'w');

z = 1:length(T_out_aver_clb);
surf([T_out_aver_clb(:) T_out_aver_clb(:)],...

```

```

        [gyro_out_aver_clb(:) gyro_out_aver_clb(:)], [z(:) z(:)], ...
        'FaceColor', 'none', 'EdgeColor', 'interp', 'LineWidth', 2);
view(2);
title('Гістерезис ДКШ', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 14);
xlabel('T, \circC', 'FontSize', 12);
ylabel('\omega_z, \circ/c', 'FontSize', 14);
set(gca, 'XGrid', 'on', 'XMinorGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'YMinorGrid', 'on');
xlim([min(T_out_aver_clb)-5 max(T_out_aver_clb)+5])
% saveas(figure, strcat('gyro hysteresis #', 32, gyro_num), 'tiff');
flag = true;
end

```

### Функція побудови графіка залежності дрейфу ММГ від градієнту температури:

```

function [flag] = temp_grad_fun_new(grad_data)
    global f
    [n, ~] = size(grad_data);
    w = 20;
    scrsz = get(0, 'ScreenSize');
    figure('Position', [300 150 scrsz(3)/2 scrsz(4)/1.5])
    set(gcf, 'color', 'w');
    for i = 1:n
        gyro_out = grad_data{i, 1};
        gyro_T = grad_data{i, 2};
        gyro_out_aver = smoothdata(gyro_out(1, f:end), 'gaussian', w);
        gyro_T_aver = smoothdata(gyro_T(1, f:end), 'gaussian', w);
        gyro_T_clb = thermo_sensor_calib_fun(gyro_T_aver);
        gyro_out_clb = gyro_out_calib_fun(gyro_out_aver);
        t = (0:length(gyro_T_clb)-1)*(hk/(3600*60));
        subplot(2, 1, 1)
        plot(t, gyro_T_clb, 'LineWidth', 1);
        title('Вихідний сигнал термодатчика ДКШ', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize',
12);
        xlabel('Час, хв.', 'FontSize', 12);
        ylabel('Температура \it{T}, \circC', 'FontSize', 12);
        set(gca, 'XGrid', 'on', 'XMinorGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'YMinorGrid',
'on');
        xlim([0 50])
        if i == 1
            ylim([min(gyro_T_clb) max(gyro_T_clb)])
        end
        hold on;
        subplot(2, 1, 2)
        plot(t, gyro_out_clb, 'LineWidth', 1);
        title('Вихідний сигнал ДКШ', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12);
        xlabel('Час, хв.', 'FontSize', 12);
        ylabel('\it{\omega_z}, \circ/c/хв', 'FontSize', 12);
        set(gca, 'XGrid', 'on', 'XMinorGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'YMinorGrid',
'on');
        xlim([0 50])
        if i == 1
            ylim([min(gyro_out_clb) max(gyro_out_clb)])
        end
        hold on;
    end
    legend('0.2 \circC/хв', '0.5 \circC/хв', '1 \circC/хв', '2 \circC/хв');
    flag = true;
end

```

### Функція побудови графіка варіації Аллана ММГ:



```

function [flag] = AV_fun(av_data, hk)
    %Функція побудови графіка варіації Аллана
    gyro_out = av_data(:, 1);
    T_out = av_data(:, 2);
    av_clb_data = gyro_out_calib_fun(gyro_out);
    T_out_clb = thermo_sensor_calib_fun(T_out);
    [~, ~] = gyro_output_fun(av_clb_data, T_out_clb);
    gyro_data = av_clb_data';
    dt = hk;
    L = length(gyro_data);
    NK = 10*fix(log2(L/2));
    tau = zeros(1, NK-1);
    for k = 0:NK
        tau(k+1) = dt*fix(2^(0.1*k));
    end
    ind = find(abs(diff(tau>1)));
    tau(ind) = 1;
    DATA.freq = gyro_data;
    DATA.rate = 1/hk;
    TAU = tau;
    % https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26659-allan-v3-0
    [AVAR] = allan(DATA, TAU);
    scrsz = get(0, 'ScreenSize');
    figure('Position', [300 150 scrsz(3)/2 scrsz(4)/1.5])
    set(gcf, 'color', 'w');
    loglog(AVAR.taul, AVAR.sig2, 'color', [1 0 0], 'LineWidth', 1)
    hold on;
    loglog(AVAR.taul, AVAR.osig, 'color', [0 0 1], 'LineWidth', 2);
    title('Варіація Аллана для ДКШ', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12);
    xlabel('\tau, c', 'FontSize', 14);
    ylabel('\sigma_A, \circ/c', 'FontSize', 14);
    set(gca, 'XGrid', 'on', 'XMinorGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'YMinorGrid', 'on');
    % saveas(figure, strcat('AV for #', 32, gyro_num), 'tiff');
    flag = true;
end

```

### **Функція побудови графіків вихідного сигналу ММГ та термодатчика:**

```

function [flag] = gyro_output_fun(gyro_data, T_out)
    %Функція побудови графіків сигналу ДКШ і термодатчика
    global f
    if nargin == 2
        gyro_out = gyro_data;
    else
        gyro_out = gyro_data(:, 1);
        T_out = gyro_data(:, 2);
    end
    hk = f;
    [k, ~] = size(gyro_data);
    t = (0:k-1)*hk/3600;
    t = t';
    w = 20; % розмір вікна
    gyro_calib_mean = smoothdata(gyro_out, 'gaussian', w);
    T_calib_mean = smoothdata(T_out, 'gaussian', w);
    gyro_std = round(std(gyro_calib_mean), 3);
    gyro_mean = round(mean(gyro_calib_mean), 3);
    max_dev = round(max(abs(gyro_calib_mean(:)-gyro_mean)), 3);
    scrsz = get(0, 'ScreenSize');
    figure('Position', [300 150 scrsz(3)/2 scrsz(4)/1.5])
    set(gcf, 'color', 'w');
    subplot(2, 1, 1);
    plot(t, T_calib_mean, 'Color', [1 0 0], 'LineWidth', 1);

```

```

title('Вихідний сигнал термодатчика ДКШ',...
      'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12);
xlabel('Час, год.', 'FontSize', 12);
ylabel('Температура T, \circ C', 'FontSize', 12);
set(gca, 'XGrid', 'on', 'XMinorGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'YMinorGrid', 'on');
xlim([f max(t)])
ylim([min(T_calib_mean)-1 max(T_calib_mean)+1])
% saveas(ffigure, strcat('Gyro temperature sensor output #', 32, gyro_num),
'tiff');
subplot(2, 1, 2);
plot(t, gyro_out, 'Color', [1 0 0], 'LineWidth', 0.5);
hold on;
plot(t, gyro_calib_mean, 'Color', [0 0 1], 'LineWidth', 1);
title('Вихідний сигнал ДКШ', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12);
annotation('textbox', [0.735 0.12 0.165 0.11],...
          'String', {[ 'C3 = ' num2str(gyro_mean) 32 '\circ/c'],...
                    [ 'CKB = ' num2str(gyro_std) 32 '\circ/c'],...
                    [ 'MB = ' num2str(max_dev) 32 '\circ/c']},...
          'LineWidth', 1,...
          'HorizontalAlignment', 'left', 'FontWeight',...
          'bold', 'FontSize', 10, 'FitBoxToText', 'off',...
          'EdgeColor', [0 0 0], 'BackgroundColor', [1 1 1]);
xlabel('Час, год.', 'FontSize', 12);
ylabel('\omega_z_i, \circ/c/год', 'FontSize', 12);
legend('без фільтр.', 'з фільтр.')
set(gca, 'XGrid', 'on', 'XMinorGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'YMinorGrid', 'on');
xlim([f max(t)])
ylim([min(gyro_out)-0.1 max(gyro_out)+0.1])
% saveas(ffigure, strcat('output gyro #', 32, gyro_num), 'tiff');
flag = true;
end

```